

# **EFFET DU MICROCLIMAT SUR L'INITIATION DE LA CORROSION DES ACIERS D'ARMATURE DANS LES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ**

THÈSE N° 3408 (2005)

PRÉSENTÉE À LA FACULTÉ ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT

Institut de structures

SECTION DE GÉNIE CIVIL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

**David CONCIATORI**

Ingénieur civil diplômé EPF  
de nationalité suisse et originaire de Miège (VS)

acceptée sur proposition du jury:

Prof. E. Brühwiler, directeur de thèse  
Prof. A.-G. Dumont, rapporteur  
Dr D. Flückiger, rapporteur  
Prof. J. Marchand, rapporteur

Lausanne, EPFL  
2006



# Table des matières

Table des matières .....	I
Préface .....	V
Résumé .....	VI
Summary .....	VII
Zusammenfassung .....	VIII
Riassunto .....	IX
Remerciements .....	X
 <b>1 Contexte de l'étude .....</b>	 <b>1</b>
1.1 Les détériorations .....	1
1.2 Régions et ouvrages à risques .....	2
1.3 Enjeux économiques .....	3
1.4 Objectifs .....	5
1.5 Organisation de l'étude .....	7
1.6 Organisation du document .....	7
 <b>2 Actions climatiques et environnementales .....</b>	 <b>9</b>
2.1 Les régions de Suisse .....	9
2.2 Epanchage de produits de déverglaçage .....	10
2.2.1 Epanchage dans les différentes régions de Suisse .....	11
2.2.2 Epanchage de produits de déverglaçage sur le pont des Trappistes - Sembrancher (VS) .....	12
2.3 Exposition des éléments d'ouvrages .....	16
2.3.1 Zones d'ouvrage exposées aux éclaboussures .....	16
2.3.2 Mise en évidence de l'exposition au brouillard par le monitoring du pont sur la Denève - A12 Vevey - Châtel .....	18
2.3.3 Etude des expositions d'ouvrages .....	19
2.3.3.1 Zones d'exposition des ponts et des viaducs .....	19
2.3.3.2 Zones d'exposition des murs de soutènement, des encorbellements et des galeries de protection ouvertes .....	20
2.3.3.3 Zones d'exposition des tranchées couvertes et des tunnels .....	21
2.3.3.4 Zones d'exposition des bâtiments .....	21
2.4 Modélisation du microclimat .....	22
2.4.1 Expositions aux pluies et à l'ensoleillement .....	22
2.4.2 Modélisation de l'exposition au brouillard sur les ponts routes .....	23
2.4.3 Epanchage de produits de déverglaçage .....	26
2.4.3.1 Simulation de l'instant de passage de la saleuse .....	26
2.4.3.2 Evaluation de la concentration en chlorures de sodium sur la chaussée .....	27
2.4.4 Précipitations nivales .....	28
2.5 Conclusions .....	30
 <b>3 Mouvements ioniques des chlorures dans le béton .....</b>	 <b>31</b>
3.1 Diffusion thermique, transport hydrique et ionique des chlorures .....	31
3.1.1 Equations générales .....	32

3.1.2	Diffusion thermique	35
3.1.2.1	Les paramètres	35
3.1.2.2	Comportement du modèle pour des éprouvettes soumises à des cycles de température	36
3.1.3	Carbonatation	37
3.1.3.1	Modélisation de la profondeur de carbonatation	38
3.1.3.2	Validation du modèle	39
3.1.4	Transport hydrique de la vapeur d'eau	40
3.1.4.1	Modélisation de la courbe d'adsorption	41
3.1.4.2	Modélisation de la courbe de désorption	46
3.1.4.3	Isotherme d'adsorption et de désorption	48
3.1.5	Transport hydrique de l'eau liquide par capillarité	49
3.1.5.1	Validation du modèle de capillarité	51
3.1.5.2	Exemple de simulation numérique	51
3.1.6	Ions chlorures dans les pores du béton	52
3.1.6.1	Diffusion des ions chlorures dans l'eau	54
3.1.6.2	Entraînement des ions chlorures par l'eau liquide et sous forme de vapeur	55
3.1.6.3	Validation du modèle de transport des ions chlorures	55
3.2	Campagne expérimentale	56
3.2.1	Recettes des bétons testés	57
3.2.2	Résistance à la compression des bétons testés	57
3.2.3	Evaluation de la porosité des bétons	57
3.2.3.1	Essai de perméabilité à l'air Torrent et de résistivité électrique Wenner	58
3.2.3.2	Refroidissement des éprouvettes	59
3.2.3.3	Séchage des éprouvettes	61
3.2.3.4	Essais de capillarité	63
3.2.3.5	Imprégnation hydrophobe	64
3.3	Sollicitations par le microclimat et les substances agressives, et résistance du béton d'enrobage	65
3.3.1	Influence de l'ensoleillement	67
3.3.2	Influence de la concentration en gaz carbonique dans l'air	68
3.3.3	Influence du type d'épandage	69
3.3.4	Influence de l'exposition de l'élément d'ouvrage	69
3.3.5	Influence de la perméabilité du béton	71
3.3.6	Influence du lieu géographique	73
3.4	Conclusions	75
<b>4</b>	<b>Probabilité d'initiation de la corrosion dans les ouvrages</b>	<b>77</b>
4.1	Approche probabiliste	77
4.2	Sollicitations	80
4.2.1	Méthode de Rosenblueth	83
4.2.1.1	Paramètres probabilistes	83
4.2.1.2	Combinaison de plusieurs paramètres probabilistes	86
4.2.1.3	Résultats des simulations numériques	87
4.2.2	Variabilité de l'enrobage	88
4.3	Résistance des aciers	90
4.4	Conséquences sur les ouvrages	91
4.4.1	Influence du coefficient de diffusion des ions chlorures dans l'eau	93
4.4.2	Variabilité de l'épaisseur de l'enrobage	94
4.4.3	Epaisseur d'enrobage, perméabilité du béton et zones d'exposition	95
4.4.4	Type d'épandage	98
4.4.5	Lieu géographique	99
4.4.6	Types d'acier	100



---

4.5	Sécurité des ouvrages	101
4.5.1	Démarches qualitatives et numériques	103
4.5.2	Vérification ou dimensionnement d'un ouvrage	105
4.6	Conclusions	107
<b>5</b>	<b>Synthèse</b>	<b>109</b>
5.1	Science de base	109
5.2	Science de l'ingénieur	109
5.3	Perspectives	110
<b>6</b>	<b>Symboles</b>	<b>111</b>
<b>7</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>127</b>
Annexe A:	Etat des connaissances	149
Annexe B:	Données météorologiques des stations ANETZ	217
Annexe C:	Enquête sur l'épandage de produits de déverglaçage dans différentes régions de Suisse	225
Annexe D:	Traitement des données des capteurs installés sur le pont de la Denève - A12	231
Annexe E:	Modèle de convection et de diffusion	237



## Préface

La corrosion des aciers d'armature dans les éléments en béton armé est la première cause des interventions de remise en état sur des ouvrages en béton armé. Dans le domaine des ouvrages d'art routiers, cette corrosion est initiée dans la majorité des cas par la présence de chlorures provenant des sels de déverglaçage utilisés pour déneiger les routes en hiver. Pendant que le phénomène de corrosion en présence d'ions chlorures est relativement bien connu, l'effet du microclimat et l'importance de l'exposition d'un élément en béton armé sur le transport des ions chlorures à travers le béton d'enrobage n'est pas encore bien compris et modélisé.

Dans sa thèse de doctorat, Monsieur Conciatori s'est proposé comme objectif d'améliorer la connaissance des paramètres impliqués dans l'initiation de la corrosion des aciers d'armature dans le béton en présence d'ions chlorures et d'en déduire la durée d'initiation de la corrosion par une approche probabiliste.

Les éléments originaux traités dans la thèse comportent la modélisation de l'exposition des éléments d'ouvrages et de l'action du microclimat. Le logiciel " TransChlor " a été développé pour simuler au moyen d'une modélisation numérique les mouvements ioniques des chlorures dans le béton. Cette modélisation complexe a l'ambition de décrire les phénomènes (de transport) importants de manière détaillée et selon des lois physiques et chimiques. Le modèle est complété par une vaste campagne expérimentale pour déterminer l'adsorption capillaire de l'eau dans le béton sous des conditions microclimatiques réelles des ouvrages. La méthode de Rosenblueth est adaptée afin de déterminer la durée d'initiation de la corrosion selon une approche probabiliste.

Monsieur Conciatori a abordé une quantité importante de sujets dans le domaine de la durabilité des ouvrages en béton armé. Une nette amélioration des connaissances sur les actions environnementales sur les ouvrages d'art routiers et leurs processus de détérioration est ainsi apportée. Les résultats sont utiles et nouvelles pour le suivi et la maintenance des ouvrages d'art.

Par cette recherche de science de l'ingénieur, Monsieur Conciatori apporte la preuve de sa maîtrise de méthodes scientifiques, ainsi que de son aptitude à cerner et à résoudre des problèmes complexes de manière indépendante. Je tiens à remercier Monsieur Conciatori pour son intérêt et son engagement pour ce sujet difficile, et je le félicite chaleureusement pour l'excellente qualité de sa recherche.

En décembre 2005

Professeur Eugen Brühwiler

## Résumé

Les détériorations des ouvrages en béton armé et les travaux de remise en état correspondants représentent un enjeu économique mondial de première importance. En Suisse, les dépenses de maintenance d'un ouvrage d'art s'élèvent à environ 40% à 65% de l'investissement initial (durée de service de 100 ans). Parmi les activités d'entretien et de renouvellement, celles liées à la corrosion absorbent la plus grande partie des ressources financières. A titre d'exemple, les bordures des ponts autoroutiers nécessitent une remise en état tous les 20 à 30 ans, interventions également coûteuses en termes d'impacts sur les usagers.

Le phénomène de corrosion des aciers d'armature dans le béton s'amorce lorsque la présence d'oxygène et d'eau est suffisante et lorsque la couche de passivation (couche naturelle de protection entourant les aciers) autour de l'acier d'armature a disparu. La disparition de cette couche protectrice est le résultat soit de la carbonatation du béton (réaction du gaz carbonique avec la pâte de ciment) soit de la présence suffisante d'ions chlorures au niveau de l'acier d'armature (provenant de l'épandage de produits de déverglaçage sur les chaussées durant les périodes hivernales), soit d'une combinaison des deux phénomènes précédents. Le mouvement de l'eau dans le béton d'enrobage favorise le mouvement d'ions chlorures et engendre ainsi une diminution sensible du temps d'initiation de la corrosion et, par corollaire, une augmentation de la rapidité des détériorations.

Cette recherche propose un modèle, appelé "TransChlor", capable d'évaluer la durée du processus d'initiation de la corrosion. Il constitue ainsi une aide à la décision permettant d'inclure la problématique de la corrosion des aciers d'armatures lors de la planification des stratégies de maintenance d'ouvrages existants ou lors du dimensionnement d'éléments d'ouvrages neufs. Le modèle peut également contribuer à l'élaboration de documents normatifs.

"TransChlor" repose sur une modélisation des ouvrages d'art qui permet une dissociation de la structure de base en éléments constitutifs distincts, chaque élément étant homogène sur les plans fonctionnel, structurel ainsi que sur le plan de la sensibilité au phénomène de corrosion (perméabilité du béton d'enrobage, degré d'exposition aux agents corrosifs, défauts locaux). Le modèle distingue notamment les éléments d'ouvrages exposés au brouillard et à l'eau liquide. Le modèle est paramétré sur la base de mesures in-situ (dont le monitoring d'un ouvrage) et d'enquêtes auprès des autorités publiques.

"TransChlor" simule, par le biais d'une approche numérique, les mouvements hydriques, les mouvements ioniques des chlorures et les transferts gazeux et thermique. La pénétration de l'eau liquide dans les pores du béton, appelée succion capillaire, fait l'objet d'une étude détaillée effectuée en laboratoire, à basses températures telles que rencontrées in situ. Ces essais ont contribué au calibrage du modèle.

"TransChlor" propose également un modèle probabiliste offrant un moyen de tenir compte des aspects non-déterministes de la problématique de la corrosion, tels que la variation spatiale de la perméabilité et de l'épaisseur du béton d'enrobage ainsi que la variation de la résistance physico-chimique des aciers d'armatures aux ions chlorures.

Le modèle déterministe augmentée de l'approche probabiliste offre une évaluation plus fine des risques de détériorations par corrosion et permet de constituer une base objective de discussion et de concertation entre maîtres d'œuvre et spécialistes de la maintenance des ouvrages.

Dans les zones exposées à l'eau liquide et à la saumure, les normes devraient imposer des dispositions supplémentaires telles qu'imprégnations hydrophobes, utilisation d'aciers inoxydables, etc. Pour les autres cas (exposition au brouillard salin et pour les bétons carbonatés sans présence d'ions chlorures), les normes devraient exiger des dispositions constructives complémentaires.

## Summary

The deterioration of reinforced concrete structures and the associated rehabilitation work represent an economic cost of premier importance. In Switzerland, the structural maintenance expenditures amount to 40% to 65% of the initial construction cost (over a 100 year life-span). Among the maintenance and rehabilitation activities, those dedicated to combating corrosion constitute the largest portion of invested financial resources. For example, the curbs of each highway bridge need to be repaired every 20 to 30 years, resulting in extensive maintenance and user costs.

The corrosion phenomenon is initiated by the presence of oxygen and water acting upon steel reinforcement with a compromised protective oxide film (a natural protective layer surrounding the steel). This protective layer is eliminated by carbonization of the concrete (the reaction between carbon-dioxide and concrete calcium-hydroxide paste), a sufficient chloride ion concentration around the steel reinforcement (introduced by the spreading of de-icing salts on the roads during winter), or a combination of the two phenomena. The water diffusion in the concrete cover facilitates the chloride ion movement, reducing the corrosion initiation time, and likewise, increasing deterioration rate.

This research proposes a model, "TransChlor," to evaluate the duration of the corrosion initiation processes. TransChlor can therefore serve as a decision aid during the structural maintenance plan selection process and during the design of new structural elements to mitigate the steel reinforcement corrosion problem. The model can also complement and elaborate upon the existing codes.

TransChlor is based on a structural analysis approach that groups the elements of a structure into distinct groups. Each group is defined by similar functional and structural qualities influencing the corrosion phenomenon (concrete cover permeability, degree of exposure to aggressive corrosive agents, local defects). The model in particular distinguishes the elements exposed to mist and liquid water. This model is based on in-situ measurements (structural monitoring) and inspections performed by trained inspectors.

TransChlor employs a deterministic approach to simulate water diffusion, chloride ion diffusion, gas penetration, and thermal conduction. The penetration of liquid water into the concrete pours, called capillary suction, was experimentally studied in the laboratory at low temperatures to match in-situ conditions. These experiments formed the calibration base of this model.

TransChlor also incorporates a probabilistic model to consider the variable and indeterminate aspects of the corrosion problem, such as the permeability space, the concrete cover thickness, and the reinforcing steel physical-chemical resistance to chloride ion attack.

The deterministic model is refined by the probabilistic approach and together TransChlor offers a more exact evaluation of the corrosion deterioration risks and can facilitate the objective dialogue and discussion between owners and maintenance specialists.

For locations exposed to liquid water and brine, the standards should impose additional protective provisions such as periodic hydrophobic impregnations, implementation of stainless steel reinforcing bars, etc. For other locations (exposed to salt spray and carbonated concrete not exposed to chloride ions), the codes should require complementary construction and maintenance provisions.

## Zusammenfassung

Die Schädigung von Bauwerken aus Stahlbeton und die entsprechenden Instandsetzungsarbeiten stellen weltweit einen bedeutenden wirtschaftlichen Faktor dar. In der Schweiz belaufen sich die Ausgaben für die Instandhaltung eines Bauwerks in der Höhe von ungefähr 40% bis 65% der Anfangsinvestition (bei einer Nutzungsdauer von 100 Jahren). Unter den Instandhaltungs- und Erneuerungsmassnahmen absorbieren jene, die mit der Korrosion zusammenhängen den größten Teil der Finanzmittel. Beispielsweise erfordern die Randabschlüsse der Autobahnbrücken alle 20 bis 30 Jahre eine Instandsetzung, kostspielige Interventionen auch in Bezug auf die Auswirkungen auf die Benutzer.

Der Korrosionsprozess beginnt, sobald der Sauerstoff- und Wassergehalt dazu ausreicht, und die Passivierungsschicht (natürliche, den Bewehrungsstahl umgebende Schutzschicht) verschwunden ist. Der Abbau dieses Schutzüberzugs ist das Ergebnis der Karbonatisierung des Betons (Reaktion von Kohlendioxyd mit Zementleim), einer ausreichenden Konzentration von Chloridionen in der Nachbarschaft des Bewehrungsstahls (aus dem Einsatz von Tausalz während der kalten Jahreszeit herrührend), oder einer Kombination der zwei vorhergehenden Phänomene. Die Bewegung des Wassers im Überdeckungsбетон begünstigt den Transport von Chloridionen und verursacht so eine spürbare Senkung der Korrosionsinitiationszeit und erhöht die Geschwindigkeit des Schädigungsprozesses.

Aus dieser Forschungsarbeit geht ein Modell mit der Bezeichnung "TransChlor" hervor, mit welchem die Korrosionsinitiationszeit abgeschätzt werden kann. Es stellt eine Entscheidungshilfe dar, mit welcher die Problematik der Korrosion des Bewehrungsstahls bei der Erhaltungsplanung bestehender Bauwerke oder bei der Bemessung neuer Bauwerke berücksichtigt werden kann. Das Modell kann ebenfalls zur Ausarbeitung von Normen beitragen.

"TransChlor" beruht auf einer Modellbildung, welche eine Unterteilung der Grundstruktur in verschiedene diskrete Bestandteile erlaubt, die auf funktioneller und struktureller Ebene, sowie bezüglich deren Empfänglichkeit für Korrosionsphänomene einheitlich sind (Durchlässigkeit des Überdeckungsбетons, Aussetzungsgrad gegenüber korrosiven Substanzen, lokale Fehlstellen). Das Modell unterscheidet zwischen Bauteilen in Kontakt mit Luftfeuchtigkeit und Bauteilen in Kontakt mit Wasser. Die Parametrisierung des Modells basiert auf in-situ Messungen (Monitoring) und Umfragen bei den zuständigen öffentlichen Behörden.

"TransChlor" simuliert die Feuchtigkeitsdiffusion, die Bewegungen von Chloridionen sowie gasförmige und thermische Bewegungen mit Hilfe eines numerischen Konzeptes. Das Eindringen von Wasser in die Poren des Betons (Kapillarität) ist Gegenstand einer detaillierten Studie, die in Labor bei niedrigen Temperaturen, wie sie in situ angetroffen werden, durchgeführt wurde. Diese Versuche haben zur Kalibrierung des Modells beigetragen.

"TransChlor" schlägt ebenfalls ein Wahrscheinlichkeitsmodell vor, welches ein Werkzeug anbietet, die nicht-deterministischen Aspekte der Problematik der Korrosion wie die Räumliche Verteilung der Durchlässigkeit und der Dicke des Überdeckungsбетons, sowie die Variation des physikalisch-chemischen Widerstandes der Bewehrungsstähle gegen die Chloridionen zu berücksichtigen.

Das deterministische, durch das Wahrscheinlichkeitskonzept ergänzbare Modell bietet eine feinere Bewertung der Schädigungsrisiken durch Korrosion an und ermöglicht eine objektive Diskussionsbasis und Abstimmung zwischen Bauherren und Spezialisten für die Erhaltung von Bauwerken.

Bei Stellen, welche dem Wasser und der Sole ausgesetzt sind, müssten die Normen zusätzliche Anordnungen wie Wasser abstossende Imprägnierungen, Verwendung von nicht rostenden Stählen auferlegen. Für die anderen Fälle (dem Salzsprühnebel ausgesetzte und ohne Anwesenheit von Chloridionen karbonatisierten Betone) müssten die Normen zusätzliche konstruktive Massnahmen fordern.

## Riassunto

Il deterioramento delle opere di costruzione in cemento armato e la loro riparazione rappresenta una sfida economica mondiale di primaria importanza. In Svizzera, le spese di manutenzione di un'opera di costruzione corrispondono approssimativamente al 40-65% dell'investimento iniziale (considerando una durata in servizio di 100 anni). Tra gli interventi di riparazione e di rinnovo, quelle legate alla corrosione assorbono la maggior parte delle risorse finanziarie. Un esempio sono i cordoli dei ponti autos-tradali, che richiedono costose manutenzioni straordinarie ogni 20 o 30 anni, e hanno un forte impatto sugli utenti degli assi viari.

Il fenomeno di corrosione degli acciai di rinforzo nel calcestruzzo si innesca per la presenza contemporanea d'ossigeno e d'acqua e quando lo strato di passività (una protezione naturale che circonda gli acciai nei calcestruzzi) è scomparso. La scomparsa di tale strato protettivo è il risultato sia della carbonatazione del calcestruzzo (reazione del gas carbonico con la pasta di cemento) sia della presenza di ioni cloruri a livello dell'acciaio di rinforzo (che proviene principalmente dall'irrorazione di prodotti che sbrinano le carreggiate durante i periodi invernali). Il movimento dell'acqua all'interno del copriferro favorisce il movimento di ioni cloruri e genera così una diminuzione sensibile del tempo d'iniziazione della corrosione e quindi un aumento della rapidità del deterioramento.

La ricerca condotta in questa tesi dottorale propone un nuovo modello, chiamato "TransChlor", capace di valutare la durata del processo d'iniziazione della corrosione. Tale modello costituisce un strumento per la corretta pianificazione delle strategie di manutenzione di manufatti esistenti e per una efficace valutazione delle problematiche legate alla corrosione delle armature nella concezione di nuove costruzioni. Inoltre, tale modello, può anche contribuire all'elaborazione delle norme in materia.

"TransChlor" si basa su una classificazione degli elementi strutturali in classi omogenee sul piano funzionali, strutturali e sul piano della sensibilità al fenomeno di corrosione (permeabilità del calcestruzzo di rivestimento, grado d'esposizione agli agenti corrosivi, difetti locali). Il modello distingue in particolare gli elementi del manufatto esposti alla nebbia ed all'acqua. Il modello è calibrato in base a misurazioni in-situ (fra cui i monitoraggi di controllo di un'opera) e dei dati disponibili presso le autorità pubbliche.

"TransChlor" simula numericamente i movimenti idrici, i movimenti ionici del cloruro ed i trasferimenti gassosi e termici. La penetrazione dell'acqua nei pori del calcestruzzo, chiamata aspirazione capillare, è stata oggetto di uno studio dettagliato effettuato in laboratorio, simulando le temperature misurate in-situ. Questi esperimenti hanno contribuito alla calibratura finale del modello.

"TransChlor" propone inoltre un modello probabilistico che offre uno strumento per tenere conto degli aspetti non deterministici della problematica della corrosione, come la variazione spaziale della permeabilità e dello spessore del calcestruzzo di rivestimento e la variazione della resistenza fisico-chimica degli acciai di rinforzi agli ioni cloruri.

Il modello deterministico aumentato dell'approccio probabilistico offre una valutazione più fine dei rischi d'asportazione per corrosione e permette di costituire una base oggettiva di discussione e di concertazione tra padroni imprenditore edile e specialisti della manutenzione dei lavori.

Nelle zone esposte all'acqua e a spruzzi d'acqua salata, le norme dovrebbero imporre disposizioni supplementari come impregnazioni idrofobe, utilizzo d'acciai inossidabili, ecc. per gli altri casi (esposizione alla nebbia salina e per i calcestruzzi carbonatati senza presenza di ioni cloruri), le norme dovrebbero esigere disposizioni costruttive complementari.

## Remerciements

Je tiens à exprimer ici ma gratitude envers celles et ceux qui ont, par leur expertise, leur soutien ou tout simplement leur présence, contribué à la concrétisation de ce travail de recherche.

Ma reconnaissance va tout particulièrement au professeur Eugen Brühwiler, directeur du laboratoire Maintenance, Construction et Sécurité des Ouvrages (MCS). Son humanité, la qualité de son écoute ont constitué un environnement de recherche idéal, emprunt d'une liberté académique riche et constructive. Merci.

Je souhaite ensuite remercier mes rapporteurs de thèses qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être membres du jury :

- Prof. Manfred Hirt, de l'EPFL, président du jury de thèse ;
- Prof. André-Gilles Dumont, de l'EPFL ;
- Prof. Jacques Marchand, de l'université Laval à Québec ;
- Dr. Dieter Flückiger, du bureau Flückiger + Bosshard AG.

Ma gratitude s'adresse également à mes collègues du Laboratoire de Maintenance, Construction et Sécurité des Ouvrages (MCS). Leur soutien et leur collaboration m'ont été extrêmement précieux. Je pense notamment à Roland Gysler, Dr. Guido Roelfstra, Dr. Hamid Sadouki, Dr. Hannes Ludescher et Dr. Emmanuel Denarié.

J'associe également à mes remerciements l' " Institute for Building Materials " du Professeur Hans Böhni et du Dr. Yves Schiegg de l'EPFZ, le LAVOC du professeur André-Gilles Dumont de l'EPFL, le "Centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB)" du professeur Jacques Marchand de l'Université LAVAL à Québec, l'IMAC du professeur Ian Smith de l'EPFL, la chaire de statistique du professeur Stefan Morgenthaler ainsi que le Dr. Yves Houst du " Powder Technology Laboratory " de l'EPFL.

La composante pratique de cette thèse n'aurait point vu le jour sans le précieux concours de la maison Boschung SA (M. Pierre-Alain Brodard) ainsi que celui des différentes administrations responsables du patrimoine routier suisse, notamment des cantons de Genève (Pascal Weber), de Fribourg (M. Laurent Brügger), de Vaud (M. Olivier Blaser, M. Paul Graber, M. Sébastien Nendaz) et du Valais (M. Albert Fournier, M. Jean-Christophe Putallaz).

Merci aussi à Dr. Bryan Adey, M. Sacha Antille, Mme. Christine Benoit, Dr. Olivier Bernard, M. James Birdsall, Prof. Jean-Philippe Charron, M. Giancarlo De Ieso, Mlle. Alix Grandjean, M. Andrin Herwig, Mlle. Aicha Kamen, M. Michael Maitre, M. Damien Métry, M. Blaise Rébora, M. Jean Tobola, M. John Wuest. Merci aussi à Katrin Habel, Francine Laferrière, Yves Putallaz et Tania Paquis qui ont eu le courage de lire toutes les virgules de mes formules. Merci à tous les autres...

Pour terminer, je fais un petit clin d'œil M. André Melly, à qui je dois beaucoup.



# 1 Contexte de l'étude

*Ce chapitre établit, en guise d'introduction, quelques aspects fondamentaux relatifs aux détériorations des structures en béton armé et en discute les conséquences sociales et économiques. Ces éléments de réflexion ont motivé le travail de recherche.*

*Le chapitre pose ensuite les jalons méthodologiques de la recherche et ainsi que la structure du présent document, offrant ainsi un fil conducteur au lecteur.*

## 1.1 Les détériorations

L'utilisation des ouvrages, l'action naturelle de l'environnement, et parfois des défauts de conception ou de construction, mènent à des dégradations structurelles, transformations inéluctables des ouvrages au cours de leur durée de service.

Les détériorations sont classées sur la base des causes afférentes, sur la base des sollicitations climatiques, mécaniques et environnementales, les actions sur la structure et les dégâts observés (Figure 1.1).

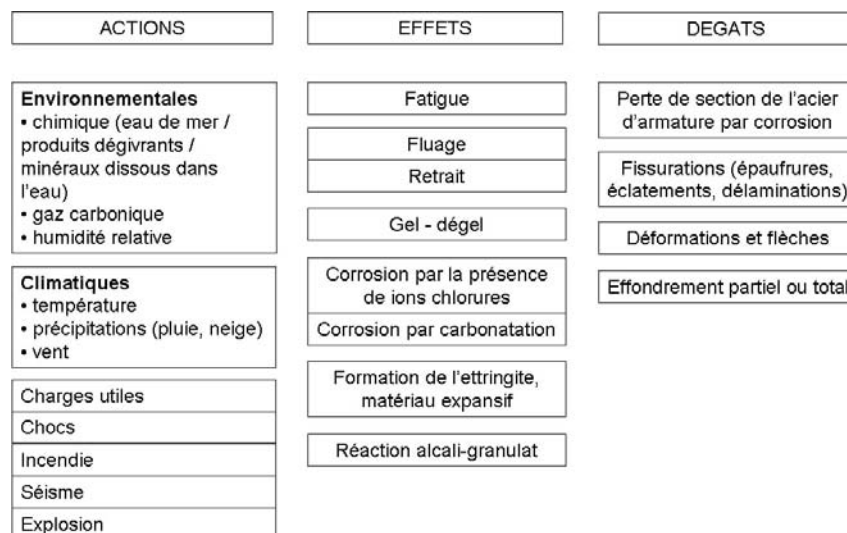


FIGURE 1.1: Causes des détériorations des ouvrages.

Les dégâts occasionnés par la corrosion des aciers d'armature dans le béton sont essentiellement causés par des défauts de conception tels qu'insuffisance d'épaisseur d'enrobage, insuffisance de la perméabilité du béton et insuffisance de la résistance des aciers d'armatures. Une étude au Japon montre que 90% des bâtiments exposés à un environnement marin présentent des épaisseurs d'enrobage insuffisantes et que le pourcentage de bâtiments âgés de 10 ans et qui souffrent déjà de détériorations est important [Masuda02].

Lors de la corrosion des aciers d'armature, les premiers dégâts perceptibles sont les fissurations dues à l'expansion des produits de corrosion (la rouille). Trois types de fissures peuvent ainsi apparaître durant ce processus : la fissuration au droit de l'armature, les éclatements et la délamination [Bruehwiler04] [Masuda02] [Taheri98]. Ces fissures sont souvent accompagnées de coulures provenant des produits de corrosion (Figure 1.2).

Le processus de corrosion débute bien avant l'apparition de fissures et la réduction de section des aciers d'armature fragilise l'état structural. L'apparition de fissures peut s'accompagner par la suite d'une augmentation des déformations, voire dans le cas ultime, de la ruine de la structure.

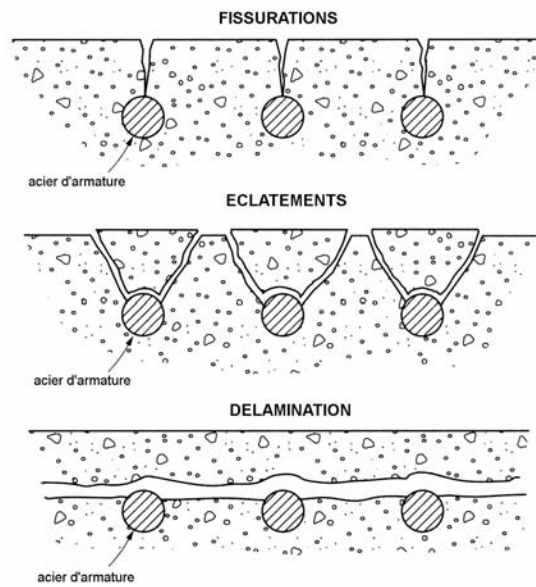


FIGURE 1.2: Types de fissures développées lors de la corrosion des aciers d'armature [Bruehwiler04].

## 1.2 Régions et ouvrages à risques

Le cas d'un pilier ornemental en fer à Delhi, vieux de 1600 ans, montre que des conditions environnementales favorables sont propices à la longévité des ouvrages [Balasubramaniam98]. Dans les régions très sèches, aucune initiation de la corrosion n'est à craindre. A l'opposé, les régions côtières, les régions aux hivers rigoureux, où la sécurité des usagers de la route nécessite l'épandage de produits de déverglaçage (corrosion en présence d'ions chlorures), les régions humides (corrosion par carbonatation) se caractérisent par des conditions environnementales défavorables. Les risques de développement des détériorations les plus rapides se situent dans les zones de cycles de mouillage et de séchage fréquents et en présence d'ions chlorures.

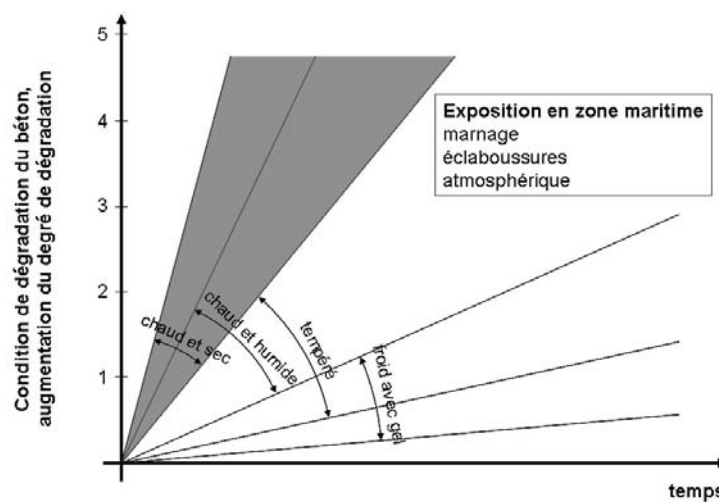


FIGURE 1.3: Influence des régions climatiques sur la vitesse de développement des détériorations en zones maritimes [Taheri98].

Le développement de la corrosion en milieu marin a eu des répercussions sur les structures bien avant l'apparition de la corrosion due à l'épandage de produits de déverglaçage, introduits durant les périodes hivernales dès les années 1960. Par conséquent, les constructions en milieu marin ont fait l'objet de recherches plus importantes et plus complètes. Néanmoins, le point faible de ces investigations demeure dans l'évaluation du temps d'initiation de la corrosion dans les zones de marnage (zones de mouillage et de séchage fréquents dues à l'action des vagues et des marées).

Le degré d'importance de l'exposition des ouvrages en milieux marins sont, dans l'ordre croissant d'augmentation de la vitesse des détériorations : les zones en contact avec l'atmosphère, les zones submergées et les zones de marnage. Les zones susceptibles de développement de la corrosion sur des ouvrages sollicités par les produits de dégivrage sont, dans l'ordre croissant de sensibilité, les zones en contact avec l'atmosphère, les zones en contact avec les éclaboussures projetées par le passage des véhicules et les zones de stagnation de saumure persistant après le passage d'une averse. Les détériorations apparaissent également plus rapidement dans les régions chaudes que dans les régions plus froides, selon une constatation faite en milieux marins où les conditions d'exposition sont similaires [Taheri98]. Ceci peut s'expliquer par la diminution de la viscosité de l'eau lorsque la température augmente, accentuant ainsi la rapidité des détériorations en région chaude (Figure 1.3).

Les ouvrages les plus sollicités dans les zones mentionnées précédemment sont les structures portuaires, les ouvrages d'art routiers et les parkings. Une étude montre que les parkings d'Amérique du Nord nécessitent des réparations importantes après cinq ans de service seulement [Laferriere05] [Litvan83].

### 1.3 Enjeux économiques

Les détériorations des ouvrages en béton armé et les travaux de remise en état correspondants représentent un enjeu économique mondial de première importance. Les activités d'entretien et de renouvellement constituent l'essentiel des dépenses durant la durée de service prévue de l'ouvrage (Figure 1.4). D'autre part, la corrosion reste le mécanisme de détérioration le plus coûteux en termes de maintenance. Elle est à l'origine de nombreux défauts apparents qui, s'ils n'engendrent pas de pertes de capacité portante de la structure, se révèlent nuisibles à l'exploitation de l'ouvrage [Thomas02]. En Amérique du Nord, l'investissement tardif dans le domaine de la maintenance provoque actuellement des déficiences structurales importantes.

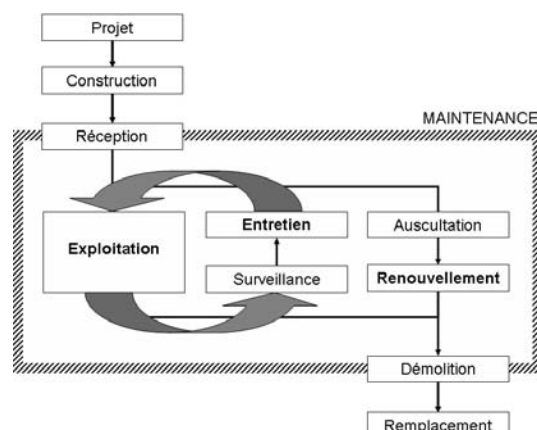


FIGURE 1.4: Gestion des ouvrages d'art [Suter89].

Les Etats-Unis doivent surveiller un inventaire près de 586'000 ponts autoroutiers (40.1% ponts en béton armé, 18.4% ponts en béton précontraint et 41.5% ponts en acier) dont 15% sont considérés comme structurellement déficients, essentiellement pour des raisons de corrosion avancée [Mancio04] [Laferriere05] [Thomas02]. La majeure partie du patrimoine d'ouvrages d'art a été construite durant les

années 1930, en réponse à la crise économique, et durant les années 1950 à 1970 lors de la réalisation du réseau d'autoroutes. Les premiers ouvrages ont atteint leur fin de vie tandis que les seconds nécessitent des travaux de maintenance majeurs. Le renouvellement ou les remplacements de ces ponts vont coûter quelque USD 10.6 milliards par an au cours des dix prochaines années, ceci pour couvrir uniquement les déficiences les plus graves [Estes03] [FHA97] [Laferriere05]. Les montants octroyés sont attribués à hauteur de 46% au remplacement d'ouvrages, 24% à la maintenance de tabliers de ponts, 24% à la maintenance d'autres éléments en béton et le solde aux constructions métalliques [Yunovich00] [Thomas02].

Au Canada, environ 40% des ponts autoroutiers ont plus de 40 ans de service. Un grand nombre d'entre eux exigent un renouvellement ou un remplacement en raison des dommages causés par la corrosion. Ces travaux sont estimés à CAD 10 milliards [Cusson04] [Laferriere05], dont 30 à 50% devraient être affectés à la remise en état des tabliers de pont [Lounis03]. Au Québec, la majorité des 4000 ponts gérés par le ministère des Transports sont en béton armé. Un grand nombre d'entre eux ont une durée de service supérieure à 50 ans et se trouvent dans un état de détérioration avancé [Marchand04]. En 1998, on estimait que 25% de ces ouvrages souffraient, à des degrés divers, de corrosion des aciers d'armature [Vezina98] [Marchand04].

Au Royaume-Uni, le département des transports estime que le coût de réparations des ponts routiers inventoriés et endommagés par la corrosion, soit environ 10%, s'élève à environ GBP 617 millions [Bromfield00] [Laferriere05].

En Suisse, les dépenses cumulées relatives au réseau autoroutier depuis sa construction totalisent CHF 64.3 milliards, dont CHF 54.4 milliards pour la construction (environ CHF 40 milliards pour les ouvrages d'art), CHF 6.7 milliards pour l'entretien et CHF 3.2 milliards pour l'exploitation (état au 31 décembre 2004) [OFROU05]. Le réseau autoroutier suisse compte 1043 ponts routiers, 1096 passages supérieurs et 1095 passages inférieurs (total de 3234), dont 53% sont en béton précontraint, 45% en béton armé et 2% en acier (état au 31 décembre 1996). La longueur kilométrique des ponts autoroutiers s'élève à 158 [km] et celle des passages inférieurs et supérieurs à 103 [km], pour un réseau autoroutier totalisant 1'594 [km] (état au 31 décembre 1996). Les coûts d'entretien du réseau autoroutier augmentent durant ces dernières années alors qu'ils plafonnent pour les routes principales et secondaires (Figure 1.5) [IFS05]. Les montants exacts imputables aux dégâts issus de la corrosion ne sont pas connus. L'exemple de remplacement des bordures de ponts autoroutiers, éléments d'ouvrage très sensibles à la corrosion par la présence de ions chlorures, permet de se faire une idée des interventions de renouvellement. Un renouvellement des bordures a été accompli tous les 15 à 25 ans pour les premiers ouvrages du réseau des routes nationales. Actuellement, en soignant les détails constructifs, la durée de service prévue s'élève de 20 à 30 ans [Tobola05]. Avec nos connaissances actuelles, la durée de service peut être encore atteinte sans renouvellements d'éléments de structure.

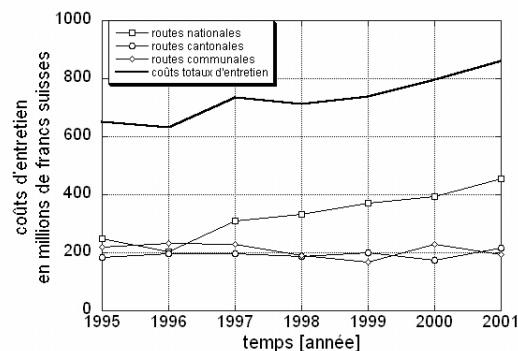


FIGURE 1.5: Montants investis en Suisse pour l'entretien des ouvrages [OFS05].

Les interventions de maintenance engendrent également des coûts indirects imputables à l'utilisateur. Ces coûts comprennent les pertes dues aux ralentissements et aux attentes, les surcoûts d'exploitation des véhicules et les coûts d'atteintes à l'environnement. Ces coûts indirects sont estimés à plus de

dix fois des coûts de maintenance et de remplacements des ouvrages corrodés [Yunovich00] [Thomas02].

A l'heure actuelle, une période de restriction économique limite les budgets d'entretien et les travaux de réparation accusent des retards. Cette constante pression sur la disponibilité des budgets de maintenance favorise le développement de nouvelles technologies de monitoring d'ouvrages, le développement de modèles plus fiables et la mise en place de surveillances et d'auscultations permettant de répertorier, de suivre et de prédire l'évolution des détériorations. L'analyse de l'évolution des détériorations permet de mieux planifier la maintenance et de procéder à un échelonnement optimal des interventions dans le temps et dans l'espace.

Les catastrophes engendrées par la ruine d'ouvrages ont un côté dramatique très médiatisé, notamment si elles ont provoqué des pertes humaines. Toutefois, de telles catastrophes ne pèsent pas dans la balance économique car le risque d'occurrence d'un tel événement reste très faible. Sur le plan écologique, la corrosion peut entraîner de graves pollutions, dans le domaine pétrolier notamment (ruptures de pipelines, naufrage de pétroliers). Des événements majeurs sont survenus après 13 ans déjà de mise en service de l'ouvrage. Malgré les progrès de la technologie, l'éventualité de telles catastrophes ne doit pas être sous-estimée (Tableau 1.1). Bien que les événements survenus sur ces ouvrages aient été engendrés en partie par la corrosion, ils sont très souvent dus à la conjonction d'une série d'événements critiques.

Evènements	Lieu	Année d'occurrence	Durée de service
Effondrement du pont Silver [Silver]	Virginie (Etats-Unis)	1967	39 ans
Effondrement de la halle de congrès de Berlin Ouest [Feld97]	Berlin Ouest (Allemagne)	1980	23 ans
Effondrement du pont Mianus River [Feld97]	Massachusetts (Etats-Unis)	1983	26 ans
Démolition du pont autoroutier Elmenrùti [Audergon00a] [Zraggen84]	canton d'Uri (Suisse)	1984	14 ans
Effondrement du plafond de la piscine d'Uster [Weibel85] [Prader85] [Barbe85] [Scherrer85] [Peyer87]	canton de Zurich (Suisse)	1985	13 ans
Effondrement d'un parking à l'Université de Syracuse [Petre00] [Thomas02]	New-York (Etats-Unis)	1995	
Effondrement du pont de Walnut Street [McDonel96]	Harrisburg, Pennsylvanie (Etats-Unis)	1996	96 ans
Effondrement d'une dalle de parking [Laferriere05]	Minnesota (Etats-Unis)		
Effondrement d'une dalle dans la cour d'un collège [Léon-Michaud05]	Yverdon (Suisse)	2005	30 ans

TABLEAU 1.1: Catalogue d'événements survenus sur les structures par l'action de la corrosion activée par les ions chlorures.

## 1.4 Objectifs

Ce travail de recherche poursuit deux objectifs essentiels,

- l'identification des différents paramètres occasionnant une initiation de la corrosion des aciers d'armature dans le béton en présence d'ions chlorures,
- l'évaluation de la durée d'initiation de la corrosion provoquée par les paramètres susmentionnés.

Ce travail propose une valorisation de plusieurs travaux de recherche, afin d'identifier des domaines à développer, notamment,

- la problématique du climat,
- l'évaluation de la présence chimique à l'interface air-béton,
- la problématique de l'effet du contact de l'eau liquide sur le béton,

- la problématique de l'effet des basses températures sur le mode de propagation de l'eau,
- et dans l'analyse des résultats.

Ce travail de recherche propose un modèle de transport TransChlor offrant une aide à la décision lors des activités de planification, aide visant d'augmenter la durabilité des ouvrages projetés ou existants par l'intermédiaire d'analyses, de recommandations et de dispositions constructives.

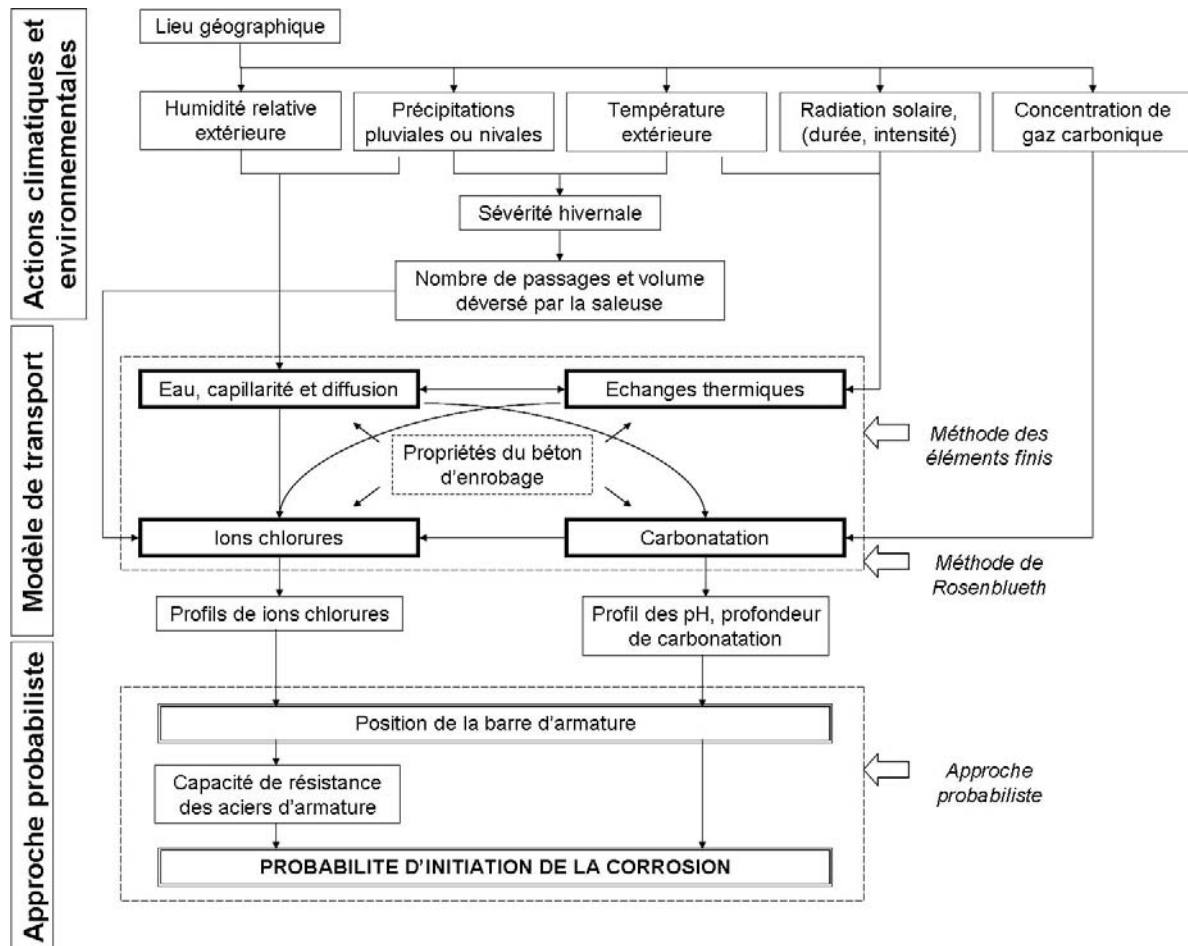


FIGURE 1.6: Démarche de ce travail de recherche permettant d'estimer la probabilité d'initiation de la corrosion des aciers d'armature dans le béton.

Le modèle de transport TransChlor simule, par le biais d'une approche numérique, les mouvements hydriques, les mouvements ioniques des chlorures et les transferts gazeux et thermique. Il prend en considération la présence d'agents agressifs et le microclimat sur la structure. La pénétration de l'eau liquide dans les pores du béton, appelée succion capillaire, fait l'objet d'une étude détaillée effectuée en laboratoire, à basses températures telles que rencontrées in situ. Ces essais ont contribué au calibrage du modèle. Le modèle de transport TransChlor propose également un modèle probabiliste offrant un moyen de tenir compte des aspects non-déterministes de la problématique de la corrosion, tels que la variation spatiale de la perméabilité et de l'épaisseur du béton d'enrobage ainsi que la variation de la résistance physico-chimique des aciers d'armatures aux ions chlorures (Figure 1.6). La résistance physico-chimique est modélisée en exploitant les données de la littérature. Par ailleurs, cette étude n'a pas comme objectif d'apporter des considérations sur le développement de la corrosion des aciers d'armature.

## 1.5 Organisation de l'étude

L'étape essentielle du travail de recherche a consisté au développement d'un modèle de transport et d'un modèle probabiliste conduisant à l'appréciation du temps d'initiation de la corrosion des aciers d'armature. Les étapes complémentaires suivantes ont permis de mettre en relief l'approche par modélisation,

- enquête auprès des administrations publiques suisses portant sur les politiques d'utilisation des produits de déverglaçage,
- analyse des volumes de produits de déverglaçage déversés par le giclage des stations automatiques de salage sur les chaussées,
- mesures des concentrations des ions chlorures épandus par des moyens mécaniques sur la chaussée d'un pont durant une saison hivernale,
- monitoring d'un pont avec mise en évidence des sollicitations climatiques, appelées également microclimat,
- développement et exécution d'essais en laboratoire, mettant en évidence essentiellement le transport d'eau liquide par succion capillaire et à basses températures.

Les travaux de modélisation se basent sur plusieurs travaux d'autres chercheurs tout en innovant au niveau du traitement :

- des conditions de bord, avec la prise en considération du microclimat réel sur les structures et de la présence d'agents chimiques estimée à partir de sondage et de modèle,
- du transport d'eau liquide par succion capillaire, avec un nouveau modèle prenant en considération les basses températures,
- de l'insertion du transport des ions chlorures entraînés par le mouvement de l'eau sous forme de vapeur et de liquide.

## 1.6 Organisation du document

Ce document se divise en 5 chapitres comprenant, outre une introduction et une conclusion, la description des travaux accomplis durant la recherche. Au début de chaque chapitre, quelques lignes donnent un aperçu des différents sujets discutés, traités et analysés. De même, à la fin de chaque chapitre, un paragraphe synthétise les idées importantes et les résultats innovants.

Les annexes regroupent l'état de l'art, les résultats des enquêtes, les résultats de mesures du monitoring d'un ouvrage et également le développement d'algorithmes et de méthodes numériques. L'état de l'art est destiné aux chercheurs entreprenant un travail dans ce domaine. L'état de l'art traite de l'approche climatique, de la notion d'interventions en cas de verglas, de la définition actuelle de l'exposition des ouvrages, de l'analyse de la microstructure des bétons, de l'état de l'art pour les différents modes de transport dans le béton d'enrobage et des notions du développement de la corrosion des aciers d'armature dans le béton.

### Chapitre 2 : “Actions climatiques et environnementales”

Le chapitre 2 traite des conditions de bord du modèle de transport TransChlor, essentiellement au travers de l'analyse d'un élément d'ouvrage exposé au microclimat et aux produits chimiques. On y trouve également les définitions précises de l'élément d'ouvrage selon son degré d'exposition aux sollicitations, du microclimat et des produits chimiques (Figure 1.6).

### Chapitre 3 : “Mouvements ioniques des chlorures dans le béton”

Le chapitre 3 décrit le modèle de transport. Une validation du modèle et des essais en laboratoire accompagnent la description de chaque mode de transport. Chaque mode de transport fait l'objet d'une analyse de sensibilité par simulations avec des paramètres déterministes (Figure 1.6).

#### **Chapitre 4 : “Probabilité d'initiation de la corrosion dans les ouvrages”**

Une approche probabiliste évalue les niveaux de sollicitation et de résistance de l'acier d'armature soumis aux ions chlorures. Cette évaluation conduit à l'obtention de la probabilité d'initiation de la corrosion des aciers d'armature dans un élément d'ouvrage en béton. Les sollicitations sont insérées dans le modèle TransChlor par une méthode de Rosenblueth. Les différents paramètres probabilistes sont étayés par des essais en laboratoire et par des résultats issus de la littérature. Le chapitre 4 décrit finalement des simulations dont les résultats sont à l'origine des premières recommandations (Figure 1.6).

#### **Chapitre 5 : “Synthèse”**

Ce chapitre conclusif reprend les éléments innovants du travail de recherche, éléments relevant tant du domaine scientifique (science de base) que du domaine de l'ingénierie (science de l'ingénieur). Finalement, le chapitre 5 conclut le rapport par un tour d'horizon des axes potentiels de recherches complémentaires.



## 2 Actions climatiques et environnementales

*L'évolution des détériorations dans les ouvrages routiers dépend de l'exposition de l'ouvrage à l'eau liquide ou sous forme de vapeur et à d'autres agents agressifs. Les bordures de ponts ainsi que les joints de dilatation des ponts sont les zones les plus exposées aux agents agressifs, aux stagnations d'eau et aux détériorations précoces [Tuutti82] [Brühwiler03A] [Hunkeler02] [Paulsson02] [Marchand03] [Costa02]. Il a également été démontré que l'évolution des détériorations est plus rapide sur des zones en contact direct avec l'eau et les agents agressifs que sur d'autres zones plus protégées [Dumont97] [Schiegg02] [Castro01] [Lindvall01] [Masuda02].*

*Ce chapitre se propose de donner les informations utiles pour définir différentes zones d'exposition d'un ouvrage, par une approche systématique. Cette approche provient d'essais publiés, et est développée de manière plus générale pour des ouvrages routiers sur la base de plusieurs hypothèses originales. Ces zones d'exposition sont sollicitées par la présence d'eau sous forme liquide et/ou de vapeur accompagnée d'un certain niveau thermique. Ceci est englobé dans le terme générique de microclimat. Un modèle à l'échelle microclimatique est développé, permettant de connaître précisément les conditions de bord à l'interface air-béton. Ce modèle transforme des données horaires d'une station météorologique située à proximité d'un ouvrage en données microclimatiques, propre à chaque élément d'ouvrage. Le monitoring d'un pont route, établi par nos soins, a mis en évidence ces différentes zones sur quelques éléments d'ouvrage et a permis une modélisation plus fine. De plus, des mesures in-situ de concentrations de saumure permettent de mieux tenir compte de la variabilité spatiale et temporelle de l'épandage de produits de déverglaçage depuis une épandeuse.*

*Le climat Suisse et la politique globale de l'épandage de produits de déverglaçage servent de base à cette étude. Le climat à l'échelle d'un pays donne les tendances grossières des situations climatiques régionales, appelées mésoclimat. En posant une loupe sur le mésoclimat et en visualisant à travers les structures de génie civil, le microclimat permet de tenir compte des paramètres locaux. Ainsi en première approche, le mésoclimat permet de définir la modélisation du microclimat et permet également de se familiariser avec les différents climats suisses. Une division en régions climatiques similaires est proposée en tenant compte de facteurs provenant des données des stations météorologiques. Dans la seconde partie de ce chapitre, l'utilisation de produits de déverglaçage est présentée et permet de débattre sur les facteurs économiques et sécuritaires. La troisième partie propose une méthode de division d'un ouvrage en éléments d'exposition similaire. Finalement, la quatrième partie présente une modélisation du microclimat sur chaque élément d'ouvrage avec une approche tridimensionnelle simplifiée.*

### 2.1 Les régions de Suisse

Les chaînes montagneuses et la situation géographique de la Suisse rendent difficile une généralisation du climat sur tout le territoire (§ A.1.1 à § A.1.4). Cependant, la disposition des stations météorologiques sur le territoire suisse permet de diviser le territoire suisse en zones territoriales climatiques similaires. Il en ressort six zones climatiques distinctes soit : les Alpes, les Préalpes, la région du Tessin, le plateau suisse, la région lémanique et la plaine du Rhône. Les climats des Préalpes, du Jura et des Grisons ont été identifiés comme des climats similaires [Zaugg04] et sont définis par la suite par le terme «Grisons». Cette similitude provient du fait que ces zones se trouvent régulièrement au-dessus des brouillards hivernaux persistants sur le plateau suisse. Aussi ce paragraphe propose un découpage de la superficie en régions de climat similaire (Figure 2.1 a). Ce découpage tient compte des critères d'altitude, de situation géographique, de possibilité d'existence d'un réseau routier et de disponibilité des données météorologiques fiables de longues durées [Zaugg04].

La sévérité des périodes hivernales se définit par le nombre de jours entiers par année où la température n'a pas dépassé le 0°C. Ce nombre de jours est ensuite moyenné sur le nombre d'années de mesures et est appelé «nombre de jours hivernaux» [MétéoSuisse04]. La comparaison de la hauteur des précipitations cumulées avec ce dernier paramètre montre une grande disparité entre les stations de montagnes et de plaine (Figure 2.1 b).

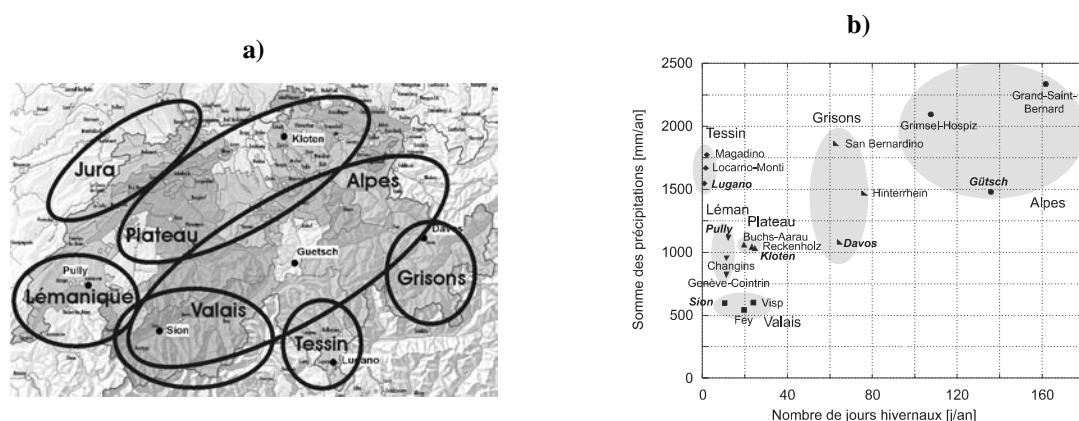


FIGURE 2.1: Différentes régions suisses de climat similaire, a) plan de la Suisse, b) caractéristiques climatiques de quelques stations météorologiques ANETZ, les stations écrites en gras et en italiques sont les stations choisies comme représentatives d'une région [Zaugg04].

En haute altitude dans les Alpes et dans le canton des Grisons, l'analyse des stations météorologiques montrent un climat où règne des températures annuelles basses, accompagnées de précipitations fréquentes. La région tessinoise se particularise par un climat doux et un faible taux d'humidité dans l'air et ce malgré d'importantes précipitations apportées par les vents humides du sud. Hors des effets du vent du Nord, la région lémanique bénéficie d'un climat tempéré qui se trouve à l'intermédiaire des deux autres régions précitées. La région du plateau se caractérise par un taux d'humidité élevé accompagné de précipitations généreuses. Durant les périodes hivernales, un brouillard persistant recouvre toute la région. Finalement, la région du canton du Valais, protégée par des barrières montagneuses, bénéficie d'un ensoleillement généreux avec peu de précipitations (Tableau 2.1). Lorsque la région du Valais est évoquée, le climat considéré se situe uniquement dans la zone de la vallée principale. Les climats des vallées secondaires et des montagnes sont très souvent différents de la vallée principale, surtout en présence de vents.

Régions (station)	Altitude [m]	Somme des précipitations [mm/an]	Humidité relative [%]	Nombre de jours hivernaux [j/an]
Alpes (Guetsch)	2287	1479	71.8	135.8
Grisons (Davos)	1590	1082	72.9	64.2
Tessin (Lugano)	273	1545	70.5	0.8
Lémanique (Pully)	461	1116	72.6	12.2
Valais (Sion)	482	598	71.8	10.4
Plateau (Kloten)	436	1031	77.1	24.5

TABLEAU 2.1: Régions suisses avec les caractéristiques principales de leur station représentative.

## 2.2 Epannage de produits de déverglaçage

La complexité politique, économique, écologique et territoriales (§ A.2) fait que les quantités de produits de déverglaçage épanchés ont une grande variabilité spatiale et temporelle. Afin de mieux cerner ces variabilités, une enquête sur le territoire suisse est proposée pour évaluer les quantités déversées sur les chaussées par les moyens mécaniques et automatiques. A l'échelle locale, des mesures avec le Sobo20 [Boschung02] permettent de mieux tenir compte de ces variabilités. Ces mesures ont été exécutées, sous l'autorité de Monsieur Meinrad Coppey (Albert Fournier et Jean-Christophe Putallaz), par les voyers Patrick Emonet et Pierre-Alain Genoud durant la période d'hiver 2004 - 2005.

### 2.2.1 Epandage dans les différentes régions de Suisse

Une enquête, effectuée dans le cadre d'un travail de diplôme [Zaugg04], auprès des autorités de plusieurs régions a permis d'évaluer les quantités de produits de déverglaçage épandus sur les chaussées. La mise en place d'un classement systématique des données n'a vu le jour que ces dernières années. La nature des données pour cette enquête se compose de tonnage annuel épandu sur un tronçon ou toute une région d'un réseau routier (Annexe C).

	Régions (station)	Quantité moyenne annuelle épandue $M_{tot}$ [ $10^6$ g/an]	Surface routière traitée [ $10^3$ m <sup>2</sup> ]	Quantité moyenne annuelle surfacique épandue $q_{NaCl}$ [g/m <sup>2</sup> an]	Propriété du réseau traité
MECANIQUES	Alpes (Guetsch)	804	262	3069	tronçon de col
	Grisons (Davos)	2788	2100	1328	tronçon autoroutier A13
	Tessin (Lugano)	213	1266	168	tronçon autoroutier A2 de Riviera à Chiasso
	Lémanique (Pully)	2923	3340	875	tronçon autoroutier
	Valais (Sion)	223	440	507	tronçon autoroutier A9
	Plateau (Kloten)	2130	4000	532	tronçon autoroutier et routes cantonales
AUTOMATIQUES	Genève	0.388	11.3	34.3	pont des Aigues-Vertes
	Vaud	3.569	127	28.1	contournement de Lausanne
	Fribourg	4.173	* 12 + 2.25	398	pont de Flamatt

TABLEAU 2.2: Régions suisses avec les quantités de chlorure de sodium épandues, \* mise en service d'un nouveau tronçon (sortie de Flamatt) durant le dernier hiver 2004 - 2005.

Une intervention d'épandage de produits de déverglaçage est influencée, certes par les précipitations, mais également par la présence d'eau sur la chaussée liée à la température, comme en période de séchage de la chaussée, en présence d'eau sur la chaussée due à la fonte de la neige ou en cas de brouillard givrant, ce dernier cas apparaît plus rarement. Par l'intermédiaire de la rigueur de l'hiver, représenté par le nombre de jours hivernaux, la quantité de chlorure de sodium épandu sur la chaussée (Annexe C) peut être déterminée avec une bonne corrélation ( $R = 0.998$ ) (Figure 2.2 a, EQ. 2.1).

$$q_{NaCl} = 21 \cdot n_h + 211 \quad (EQ\ 2.1)$$

$n_h$  [jours/an] nombre de jours hivernaux selon la rigueur de l'hiver (définition § 2.1),

$q_{NaCl}$  [g/m<sup>2</sup>] quantité surfacique moyenne annuelle d'épandage de chlorures de sodium.

Le nombre de jours hivernaux s'étend en montagnes dans les Alpes et dans le canton des Grisons sur une durée de 2 à 4 mois, tandis qu'en plaine, sa durée reste inférieure à 30 jours. Sur le plateau suisse, la rigueur est plus accentuée que sur la région lémanique et dans le canton du Valais. Par contre, le canton du Tessin possède un climat doux en période d'hivernale.

Pour l'épandage automatique de chlorure de sodium, il existe également une bonne corrélation ( $R = 0.815$ ) entre la rigueur de l'hiver et les quantités de chlorure de sodium épandues annuellement (Figure 2.2 b, EQ. 2.2). Ces installations ont été implantées en Suisse dans trois régions : le pont de Flamatt dans le canton de Fribourg, le pont des Aigues-Vertes à Genève et sur l'autoroute de contournement de Lausanne, tronçon d'environ dix kilomètres, dans le canton de Vaud (§ A.2.2). Le nombre de stations automatiques de déverglaçage reste faible par rapport aux interventions avec les moyens méca-

niques. Aussi la corrélation entre la rigueur de l'hiver et les consommations en chlorure de sodium s'effectue sur un éventail restreint de données. La droite de régression, pour les installations automatiques de salage, a été choisie avec une pente identique de celle des interventions par moyens mécaniques. Sans prendre en considération cette hypothèse, l'augmentation de la pente s'élève à environ 50% de l'autre de régression.

$$q_{\text{NaCl}} = 21 \cdot n_{\text{hiv}} - 73 \quad (\text{EQ 2.2})$$

Dans la région fribourgeoise, les conditions hivernales sont plus sévères que dans la région lémanique. Les précipitations nivales sont ainsi plus importantes et le giclage automatique des buses ou assiettes se produit d'autant plus sous ces conditions hivernales, car la dissolution des chlorures de sodium est rapide. Pour les prochains hivers, une optimisation des programmes de giclage en période de précipitation nivale sera effectuée qui devrait réduire les quantités de produits déversés lors de ces précipitations nivales [Gambera05].

Sur le contournement de Lausanne (canton de Vaud), les variations d'altitude engendrent des climats changeant tout le long du tronçon (Figure 2.2 b). Cependant, la politique d'épandage de produits de déverglaçage, mise en évidence par la consommation annuelle de chlorure de sodium NaCl (Figure 2.2 b), reste identique sur la totalité du tronçon de contournement.

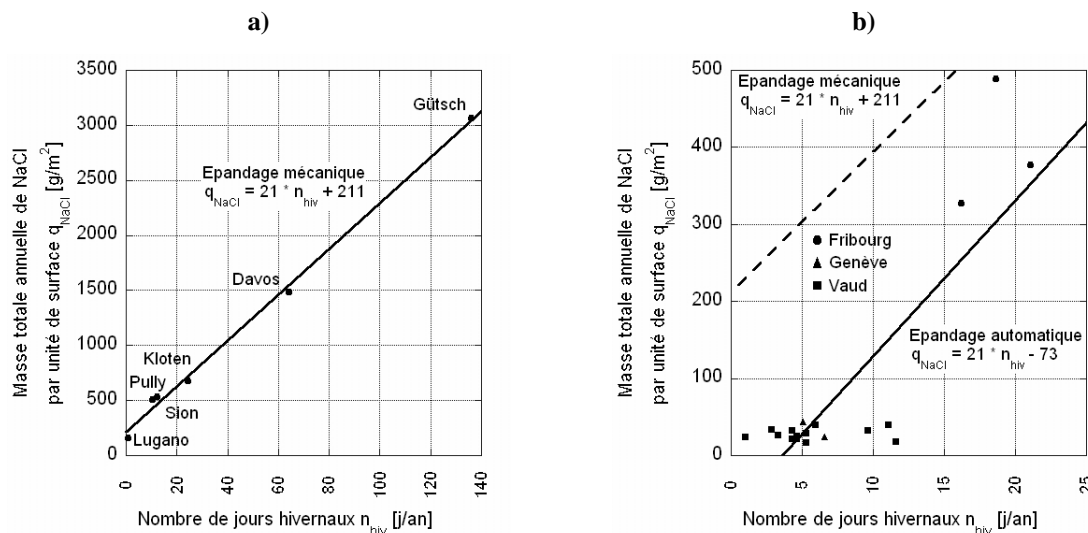


FIGURE 2.2: Corrélation entre l'épandage de chlorure de sodium et de la sévérité de l'hiver, a) par des moyens mécaniques d'épandage (\* la valeur moyenne tient compte seulement des années où le nombre de jours hivernaux a pu être mesuré) [Zaugg04], b) par des moyens automatiques d'épandage.

## 2.2.2 Épandage de produits de déverglaçage sur le pont des Trappistes - Sembrancher (VS)

### a) Objectifs

Le pont des Trappistes se situe à une altitude moyenne de 690 mètres sur une route d'accès au col du Grand-Saint-Bernard reliant la Suisse à l'Italie (tronçon de la route cantonale Martigny - Sembrancher). Cet ouvrage se situe dans une zone sensible au verglas. En période hivernale, la topographie provoque un ensoleillement limité et des congères de neige sur le bord de la chaussée et la rivière (la Dranse) rendent ce tronçon très humide. Les interventions d'épandage de produits de déverglaçage sont alors quotidiennes. Sur toute la longueur du pont (29 mètres), des mesures de concentrations de chlorures de sodium permettent une comparaison entre les quantités déversées par les épandeurs et les concentrations mesurées. De plus, ces mesures permettent de mettre en évidence la variabilité spatiale et temporelle de l'épandage. Deux types d'interventions peuvent être définies soit les interventions curatives ou

les interventions préventives. Lorsque l'on peut prévoir, selon l'évolution des conditions météorologiques, d'un danger de formation de verglas imminent sur la chaussée, on parle alors de salage préventif. Alors que lorsque le verglas est déjà présent sur la chaussée, la dénomination est dans ce cas salage curatif.

Ce pont est constitué de plusieurs poutres surmonté d'un tablier de pont mesurant 13 mètres et comportant 3 voies de circulation. Les bordures dépassent d'une dizaine de centimètres le revêtement bitumineux. Les culées sont construites en biais pour s'aligner au passage du torrent. L'évacuation de l'eau s'effectue par un dévers transversal d'environ 3.5% sur le côté est, bas du dévers. Une légère pente longitudinale de 0.4% empêche une stagnation d'eau sur le bas du dévers du tablier (Figure 2.3).



FIGURE 2.3: Pont des Trappistes a) Photo du dessus du pont [Borgeat04], b) profil en travers du pont avec indication de la position des mesures.

Les mesures de concentration de chlorure de sodium sur les chaussées s'effectuent avec un appareil, nommé Sobo20 [Boschung02]. Le Sobo20 mesure la résistivité électrique des solutions salines. La

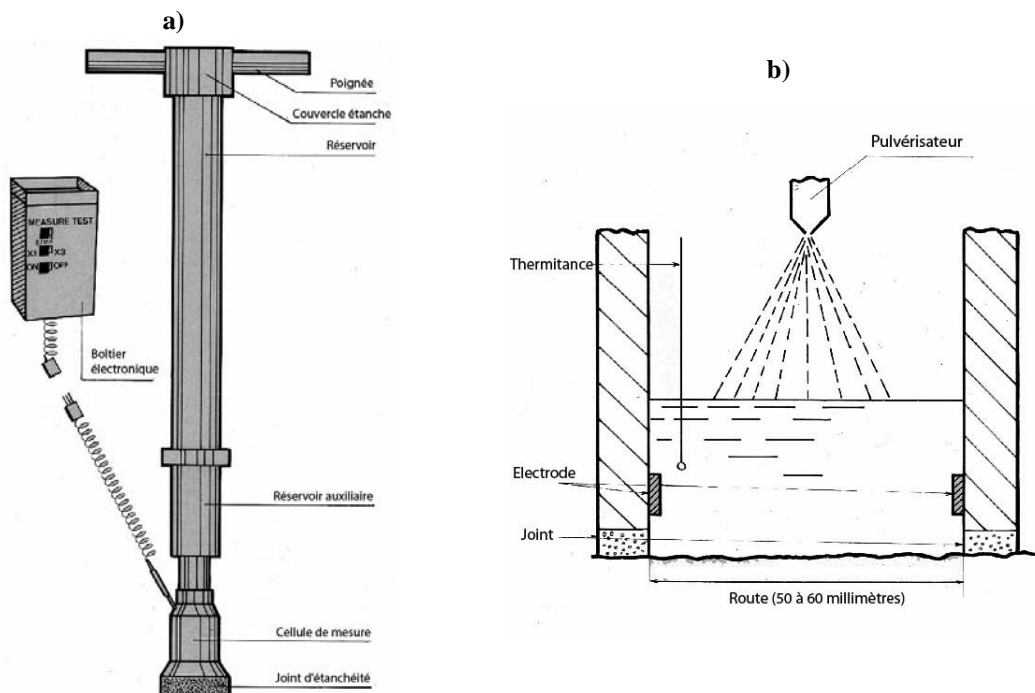


FIGURE 2.4: Capteur Sobo20, mesures de la concentration de chlorure de sodium [Boschung02] a) aperçu de l'appareil, b) cellule de mesure.

quantité surfacique de chlorure de sodium est immédiatement déduite avec une précision de  $0.5 \text{ [g/m}^2\text{]}$

dans nos mesures (Figure 2.4). Une étape de mesure avec le Sobo20 correspond à trois mesures à différentes positions sur la chaussée.

- côté ouest de la chaussée, se situant sur le haut du dévers,
- sur le centre de la chaussée,
- côté est de la chaussée, se situant sur le bas du dévers.

Les conditions climatiques locales sont le principal facteur pour le choix de quatre jours de mesures. Durant ces quatre jours, les concentrations de chlorure de sodium furent mesurées à différents intervalles de temps, les conditions météorologiques et le type d'intervention sont discutés ci-après.

- **jour 1**, 29.11.2004, intervention préventive, temps pluvieux avec températures avoisinant les 0°C,
- **jour 2**, 21.02.2005, intervention curative, temps sec avec giboulées et températures inférieures à 0°C,
- **jour 3**, 25.02.2005, intervention curative, temps sec (chaussée humide) avec températures très basses,
- **jour 4**, 15.03.2005, intervention préventive, temps sec (pluie pendant la nuit) avec températures avoisinant les 0°C.

Le passage de l'épandeuse s'effectue selon les deux directions. Dans le véhicule, le voyer a la possibilité d'épandre le chlorure de sodium en réglant la largeur d'épandage. Ainsi souvent, ce dernier augmente la largeur d'épandage sur la voie du milieu pour éviter un troisième passage. L'épandeuse est le plus souvent réglée pour diffuser environ 5 à 7 [g/m<sup>2</sup>] de chlorure de sodium par passage.

#### **b) Jour 1**

Les conditions météorologiques ont été évolutives durant ce jour. En effet, des précipitations ont arrosé le pont par intermittence durant la nuit et dans l'après-midi (13h00 à 17h00). Le matin, le temps était plus stable, soit sec et couvert. La température du matin était de 4.5°C.

Deux interventions d'épandage de chlorure de sodium se sont déroulées durant cette journée. La première, le matin (8h30), puis la seconde en début d'après-midi lors du retour des précipitations (13h15). Le dernier épandage enregistré, avant le jour de mesures, s'est déroulé le matin (5h00) du jour précédent aux mesures.

Les premières mesures montrent des quantités de chlorure de sodium similaires sur le haut et le bas dévers. Par contre, la quantité est doublée sur la chaussée centrale, certainement due au double passage de l'épandeuse et au réglage plus large de l'épandage des chlorures de sodium sur la chaussée. Le passage des véhicules peuvent également projeter la saumure sur la voie centrale. Les mesures montrent également un accroissement des quantités sur les points de mesures juste après le passage de l'épandeuse. Par la suite, les mesures montrent également la dissolution du chlorure de sodium suite à une légère pluie. Les quantités présentes sur la chaussée correspondent bien aux quantités déversées par l'épandeuse. L'augmentation des concentrations des ions chlorures, lors du second passage, montre également une augmentation proportionnelle à la quantité déversée par l'épandeuse (Figure 2.5 a).

#### **c) Jour 2**

Les conditions météorologiques sont restées nuageuses accompagnées de quelques giboulées de neige durant cette journée et entrecoupées d'une éclaircie en fin de matinée (11h00). Les températures n'ont pas dépassé les 0°C (-3°C à 8h00, -1°C à 11h00 et -3°C à 17h00).

Trois passages de l'épandeuse se sont succédé durant cette journée. La première intervention a été appliquée sur toute la largeur de la chaussée (6h00). Profitant des résultats de ces mesures, les voyers ont appliqué un épandage seulement sur la voie ouest, correspondant au haut du dévers (11h00 et 17h00).

Les premières mesures sont marquées par la variabilité spatiale et les quantités de chlorure de sodium mesurées sont différentes selon la position de la mesure. Ainsi sur le haut du dévers la quantité est faible. Le centre de la chaussée et le bas du dévers ont reçu une quantité plus ou moins équivalente.

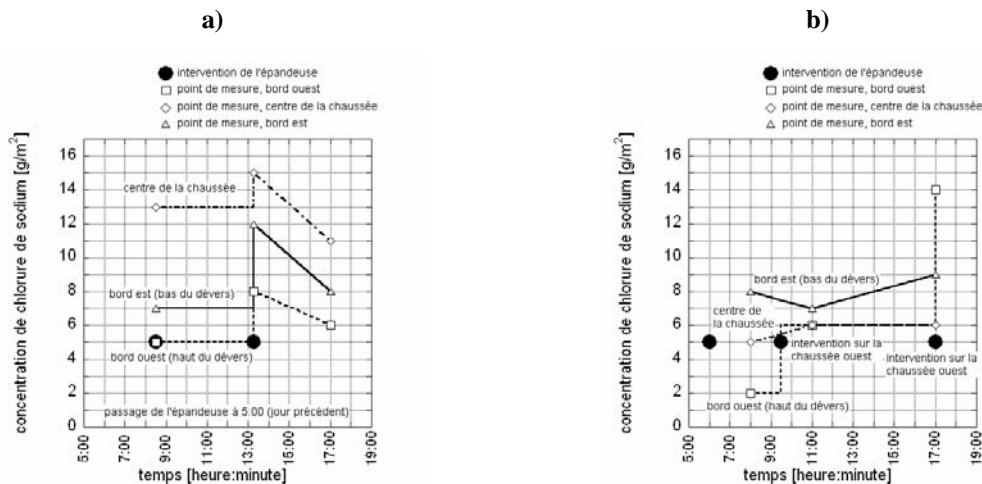


FIGURE 2.5: Mesures des quantités de chlorure de sodium a) au jour 1, b) au jour 2 (Les droites établies entre 2 points de mesures sont hypothétiques selon les données d'interventions fournies par les voyers).

Les voyers ont pris la décision, en interprétant les résultats des mesures, d'intervenir seulement sur une chaussée. Ainsi lors du passage de la saleuse sur cette partie de chaussée, on remarque une augmentation importante de la quantité de chlorure de sodium seulement sur cette partie de la chaussée. Le changement de concentration sur les autres parties de la chaussée est simplement dû à la variabilité spatiale des mesures (Figure 2.5 b).

#### d) Jour 3

Les conditions météorologiques ont été changeantes durant ce jour, puisque le soleil fut présent une grande partie de la journée avec sur le soir des enregistrements de précipitations nivales. Le gradient de température a été plus important, très froid le matin pour dépasser le seuil du zéro degré Celsius en mi-journée puis rechuter dès la disparition du soleil ( $-11^{\circ}\text{C}$  à 8h00,  $-11^{\circ}\text{C}$  à 9h00,  $+3^{\circ}\text{C}$  à 14h00,  $-4^{\circ}\text{C}$  à 19h00).

Le dernier épandage enregistré s'est déroulé le matin (16h15) du jour précédent aux mesures. Les conditions météorologiques clémentes et le revêtement d'apparence sèche n'a pas nécessité d'intervention durant la journée. Cependant l'apparition des précipitations en fin de journée a nécessité un épandage en fin de journée (17h00).

Durant la journée, les concentrations en chlorures de sodium ont été stables. Les précipitations en fin de journée ont nécessité une intervention d'épandage ce qui a certainement provoqué une augmentation des concentrations de chlorure de sodium. Malheureusement il n'existe pas de mesures sitôt après le passage de l'épandage. Ainsi, le saut (Figure 2.6 a) des concentrations en chlorures de sodium (17h00) est totalement hypothétique. Par la suite, le retour aux valeurs mesurées précédemment provient de la dissolution des chlorures de sodium et de l'évacuation de l'eau la chaussée par le passage d'une lame d'un chasse-neige ou de la gravité.

#### e) Jour 4

Les conditions météorologiques ont été stables durant ce jour, puisque le soleil fut présent toute la journée. Précédant cette journée, des précipitations ont arrosés le pont durant la nuit. Les températures, proches du  $0^{\circ}\text{C}$  le matin se sont élevées en cours de journée ( $3^{\circ}\text{C}$  à 5h00,  $3^{\circ}\text{C}$  à 8h00,  $10^{\circ}\text{C}$  à 11h00 et  $9^{\circ}\text{C}$  à 17h00).

Une intervention préventive a lieu le matin, due à la présence d'eau sur la chaussée et aux températures proches  $0^{\circ}\text{C}$ .

L'unique intervention de la journée et le temps sec montrent ici la variabilité spatiale des mesures. La quantité de chlorure de sodium est également plus faible qu'attendue. Comme l'intervention était plutôt préventive, le voyer a certainement économisé les quantités de chlorure de sodium durant cette intervention (Figure 2.6 b).

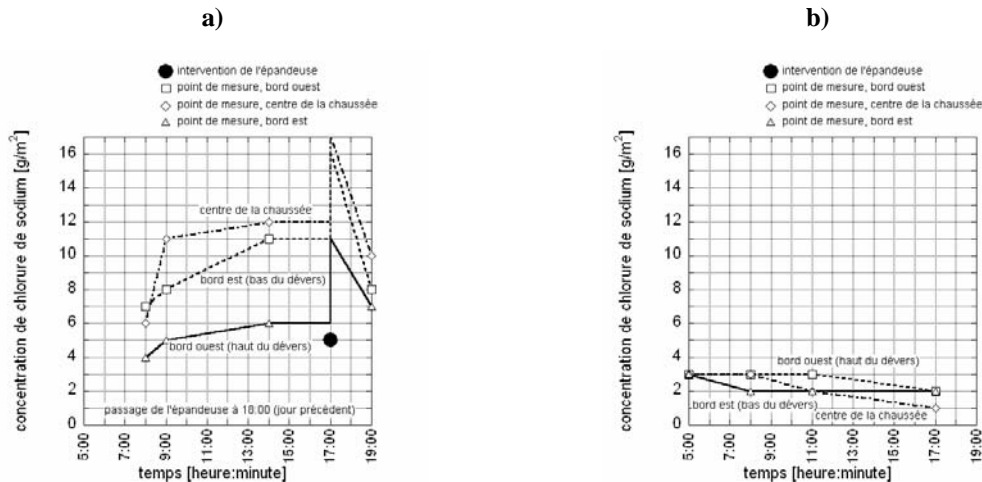


FIGURE 2.6: Mesures des quantités de chlorure de sodium a) au jour 3, b) au jour 4 (Les droites établies entre 2 points de mesures sont hypothétiques selon les données d'interventions fournies par les voyers).

### f) Points importants

Ces investigations montrent que la fluctuation des quantités de chlorure de sodium épandues dépend essentiellement des précipitations. Les apports par un système d'épanduse montrent une bonne représentativité des quantités présentes sur la chaussée. Sans précipitation, les quantités de chlorure de sodium demeurent sur la chaussée et les mesures effectuées montrent la variabilité spatiale se situant dans un ordre de grandeur de 1 [g/m<sup>2</sup>]. Lors de précipitations, les mesures ne montrent pas une augmentation des quantités de chlorure de sodium sur le bas du dévers. Par contre, cet état de fait peut évoluer lors de risques de stagnation d'eau pluviale sur la chaussée.

Ainsi, les paramètres clefs pour une modélisation des concentrations de chlorure de sodium sur la chaussée sont : connaître l'instant d'épandage, connaître la quantité de chlorure de sodium déversée sur la chaussée et suivre l'évolution des précipitations après épandage des chlorures de sodium.

## 2.3 Exposition des éléments d'ouvrages

La frontière entre deux zones d'exposition est très difficile à établir sur un ouvrage. Ce paragraphe propose une délimitation entre la zone d'éclaboussures et les autres zones d'exposition à partir de résultats d'essai [Tang00b]. La variabilité du microclimat dans les zones de brouillard salin ou non est discutée à partir d'un monitoring de différentes zones d'un pont d'autoroute [Conciatori03]. Finalement, plusieurs types d'ouvrages sont étudiés en sectionnant les différentes zones d'exposition rencontrées.

### 2.3.1 Zones d'ouvrage exposées aux éclaboussures

En zone d'éclaboussures, la hauteur où les ions chlorures risque d'avoir une action prépondérante se situe en-dessous de 2.5 à 3 mètres (Figure 2.7 c) [Kropp95]. En partant de l'hypothèse qu'une gouttelette d'eau suit une trajectoire passant par deux points (§ A.3.2) [Tang00b], il est possible de déterminer son énergie cinétique, soit la vitesse initiale de la goutte  $v_0$  et l'angle initial  $\alpha$  au moment de la projection (Figure 2.7 a). Cette énergie cinétique transversale de la gouttelette est mise en relation linéaire avec l'énergie cinétique longitudinale du véhicule. La vitesse limite prescrite pour les autoroutes en Suède est de 110 [km/h] (Figure 2.7 b, EQ. 2.3). Cette relation linéaire est une simplification importante car l'énergie cinétique de la gouttelette provoquée par le mouvement des véhicules n'est pas transversale mais certainement inclinée dans la même direction de la marche des véhicules. Cette composante d'inclinaison varie en fonction de la vitesse du véhicule, du type du véhicule, du type de roues et des caractéristiques de la chaussée.



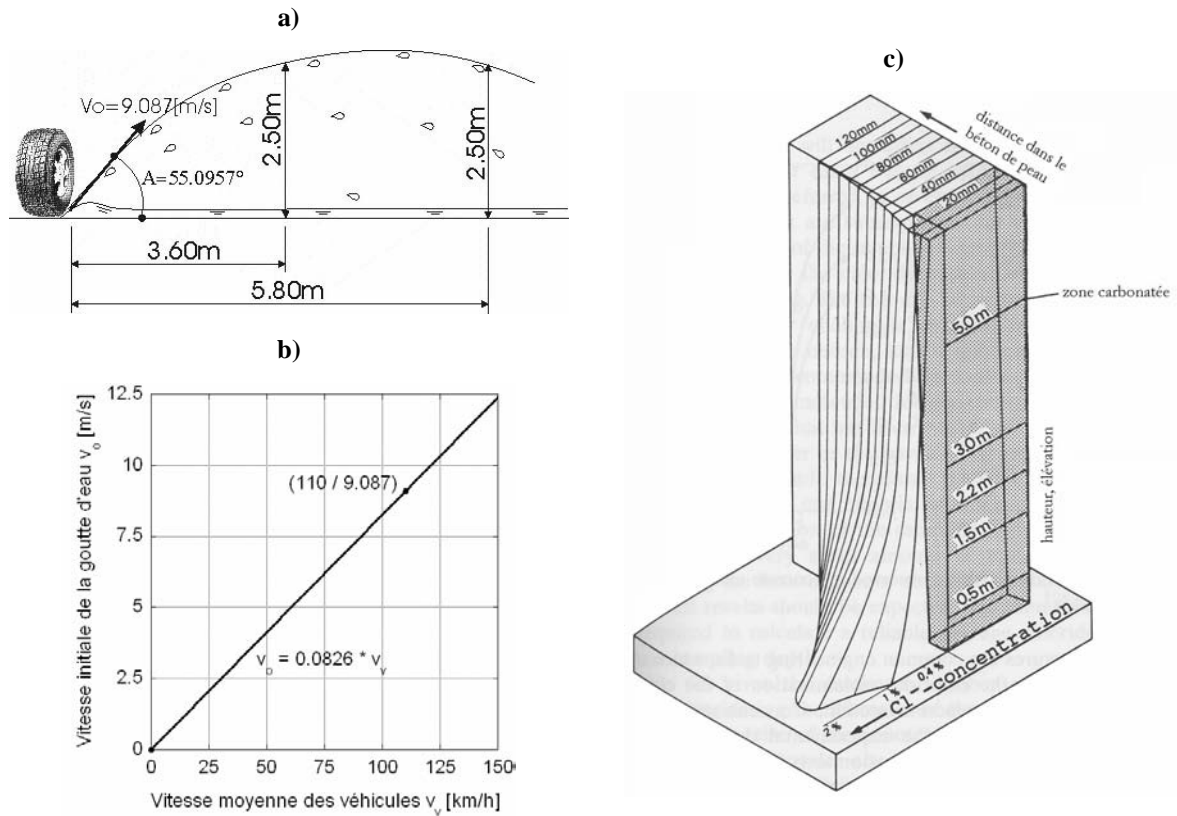


FIGURE 2.7: Modélisation des projections des éclaboussures due au passage des roues sur la chaussée, a) Schéma de la trajectoire d'une goutte d'eau, b) Relation de la vitesse des véhicules et de l'énergie cinétique de la goutte d'eau c) Mise en évidence des zones d'éclaboussures à travers la distribution des ions chlorures dans un élément de structure vertical [Kropp95].

A partir de ces données, il est possible de prédire le gabarit admissible de projection en fonction de la vitesse moyenne du véhicule et en fonction de l'angle de projection initial  $\alpha$ , et ainsi de visualiser les zones d'impact des gouttelettes éclaboussées sur les structures (Figure 2.8, EQ. 2.4). Ceci au moyen d'un modèle se basant sur les équations utilisées dans la balistique [Gruber88]. Ces formulations (EQ. 2.3, EQ. 2.4) prennent en considération une chaussée avec une évacuation d'eau selon les chaussées usuelles, soit sans stagnation d'eau.

$$v_0 = 0.0826 \cdot v_v \quad (\text{EQ } 2.3)$$

$$y = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{v_0^2}{g} - \frac{x_t^2 \cdot g}{v_0^2} \right) \quad (\text{EQ } 2.4)$$

- $v_0$  [m/s] vitesse initiale d'une gouttelette d'eau projetée latéralement par le passage d'un véhicule sur une chaussée humide,
- $v_v$  [km/h] vitesse moyenne des véhicules sur un tronçon de route,
- $\alpha$  [°] angle initial par rapport à l'horizon de la direction prise par une gouttelette projetée lors du passage d'un véhicule sur une chaussée humide,
- $g$  [m/s<sup>2</sup>] force d'attraction terrestre (9.81),
- $x_t$  [m] distance transversale à une voie de circulation depuis le bord de la chaussée,

y [m] distance verticale correspondant au gabarit de projection de gouttelettes.

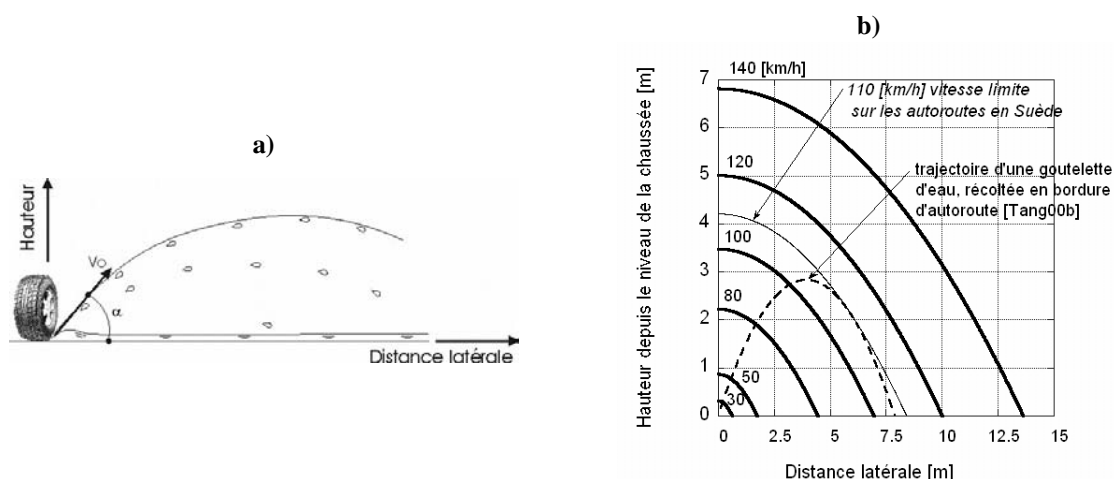


FIGURE 2.8: Gabarit de projection de gouttelettes en fonction de la vitesse moyenne des véhicules, avec, en traitillé, la trajectoire de base du modèle, provenant de la récolte des eaux dans des gouttières à différents niveaux du sol et à différentes distances en bordure de route [Tang00b].

### 2.3.2 Mise en évidence de l'exposition au brouillard par le monitoring du pont sur la Denève - A12 Vevey - Châtel

Le pont sur la Denève se situe sur le tronçon autoroutier reliant la région lémanique au plateau suisse (tronçon Vevey à Châtel-Saint-Denis). Ce tronçon se caractérise par une forte déclivité. Le pont, légère-

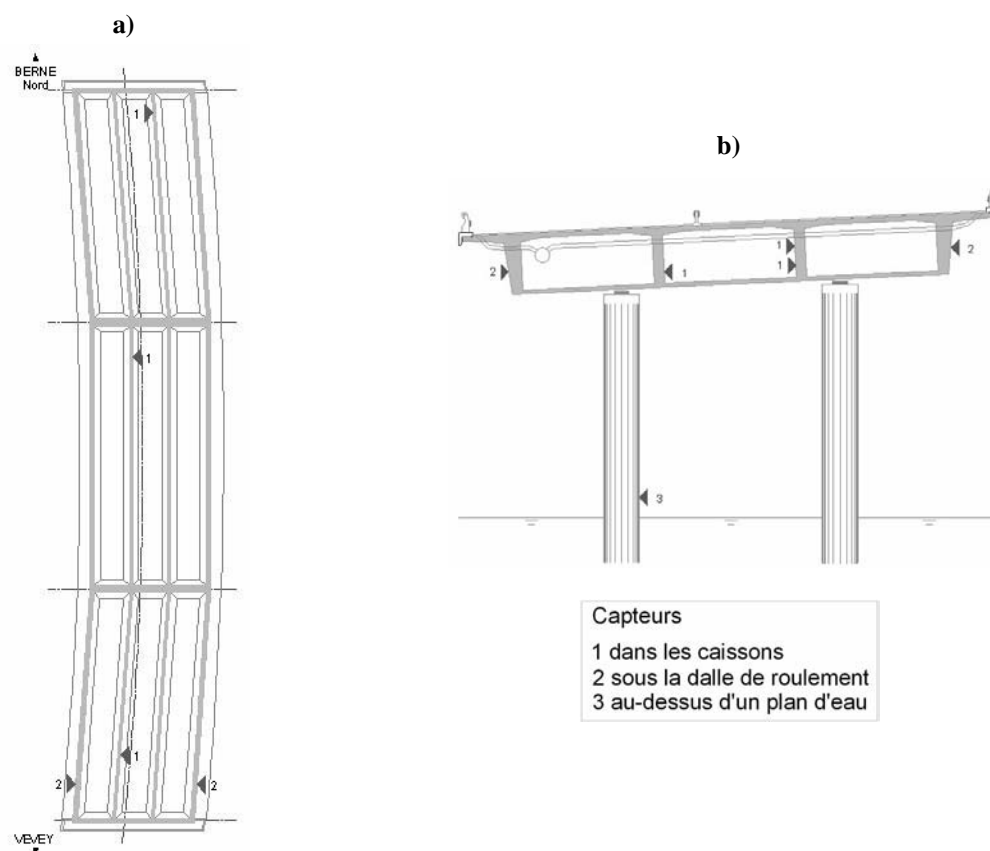


FIGURE 2.9: Disposition des capteurs sur le pont sur la Denève, a) vue en plan, b) profil en travers [Nendaz02].

ment courbe, est constitué de trois travées d'environ 42 mètres. Le profil du pont en caisson est cloisonné par deux parois formant ainsi trois éléments. Le pont accueille quatre voies et la largeur totale de roulement mesure 24 mètres. La station météorologique du pont sur la Denève fournit les données sur la température de l'air, l'humidité relative de l'air et les précipitations. D'autres capteurs, mesurant la température et l'humidité relative de l'air, ont été placés sur différentes zones de l'ouvrage, abrités de l'influence des eaux de précipitations. Ces différentes zones permettent de séparer l'atmosphère à l'intérieur des caissons, sous la dalle de roulement et au-dessus d'un plan d'eau (fixé à une pile de pont à environ 1.5 mètres d'une rivière) (Figure 2.9). Ces capteurs permettent de mettre en évidence le microclimat de l'ouvrage (§ A.3).

Par rapport aux mesures des stations météorologiques, le signal des capteurs est atténué pour les mesures des températures et d'humidité relative dans toutes les zones de mesures à l'abri des intempéries. Cette atténuation est d'autant plus marquée (§ 2.4.2), lorsqu'elle est protégée des influences extérieures. Ainsi l'atténuation a été plus importante, dans l'ordre hiérarchique, dans les caissons, sous la dalle de roulement et au-dessus d'un plan d'eau [Conciatori03].

### 2.3.3 Etude des expositions d'ouvrages

Une description plus détaillée de l'approche segmentielle (§ A.3.5) n'est pas entreprise ici. Elle peut cependant être consultée plus en détail dans la littérature [Roelfstra00]. Par contre, une aide pour la division en segments par rapport à différents types d'exposition est proposée dans la suite de ce document pour plusieurs catégories d'ouvrage (ponts, viaducs, murs de soutènement, encorbellements, galeries de protection ouvertes, tranchées couvertes, tunnels et bâtiments). Les exemples proposés sont principalement développés pour les ouvrages d'art intégrant les routes à grand débit. La terminologie adoptée dans les exemples se rapporte aux différentes zones d'exposition (§ A.3).

- S : exposition aux eaux stagnantes,
- E : exposition aux éclaboussures,
- B : exposition au brouillard,
- CL : exposition aux ions chlorures en périodes hivernales.

Souvent dans ce rapport de recherche, les termes exposition à l'eau liquide ou à la vapeur d'eau sont utilisés. Le premier terme prend en considération les zones d'exposition à l'eau stagnante et aux éclaboussures, tandis que le deuxième terme correspond à l'exposition au brouillard.

#### 2.3.3.1 Zones d'exposition des ponts et des viaducs

Les ponts et viaducs, s'ils sont réalisés sans étanchéité sous le revêtement bitumineux, présentent une exposition aux eaux stagnantes et à des risques de présence d'ions chlorures. Le cas est similaire si l'étanchéité de la dalle de roulement fait défaut. Les bordures sont généralement soumises aux éclaboussures, y compris sur les faces verticales des bordures qui peuvent être atteintes par des coulures. Les zones où les joints sont défectueux, ainsi que par un système de drainage des eaux de surface défectueux, peuvent également avoir une exposition aux eaux stagnantes avec présence d'ions chlorures. Les zones protégées des intempéries, comme les piles de pont, la partie sous dalle de roulement, sont des zones d'exposition au brouillard salin. Dans les caissons, la zone d'exposition peut être assimilée à une zone d'exposition au brouillard mais sans présence d'ions chlorures si aucune infiltration n'est relevée (Figure 2.10).

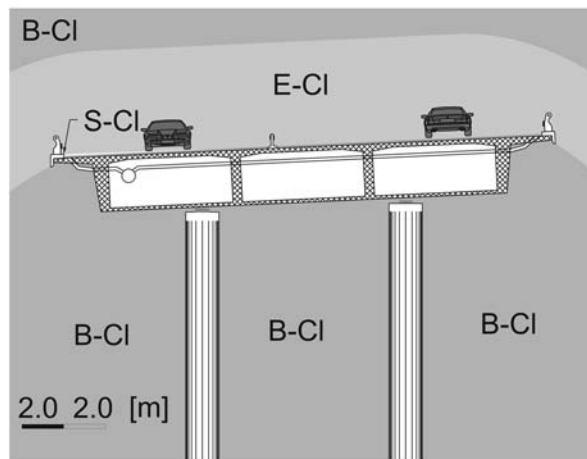


FIGURE 2.10: Profil type d'un pont ou viaduc autoroutier avec les différentes zones d'exposition pour une vitesse des véhicules à 120 [km/h], plan de base tiré de [Nendaz02].

### 2.3.3.2 Zones d'exposition des murs de soutènement, des encorbellements et des galeries de protection ouvertes

Une grande partie des surfaces du béton de ces ouvrages sont en contact avec le terrain naturel. La présence d'eau dans les terrains est importante, même si ces surfaces sont drainées, on peut admettre que ces faces sont toujours saturées d'eau [Buchwald00]. Si les infiltrations d'eau de la chaussée sont possibles, il peut se développer un contact avec de l'eau sous forme saturée en présence d'ions chlorures. Cette présence reste négligeable, car elle est diluée dans un terrain gorgé d'eau [Siemes98].

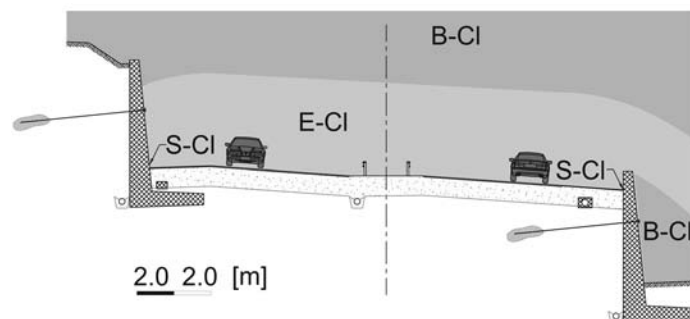


FIGURE 2.11: Profil type d'une chaussée autoroutière dans un terrain en pente avec deux murs de soutènement en amont et en aval, avec les différentes zones d'exposition pour une vitesse des véhicules à 120 [km/h], plan de base tiré de [Tobola04].

Pour les surfaces hors contact avec le terrain naturel, les mêmes considérations peuvent être établies que précédemment (§ 2.3.3.1). Pour les murs s'élevant au-dessus de la chaussée, il y a lieu de définir une zone d'éclaboussures avec les gabarits proposés (Figure 2.8, Figure 2.11, Figure 2.12 a).

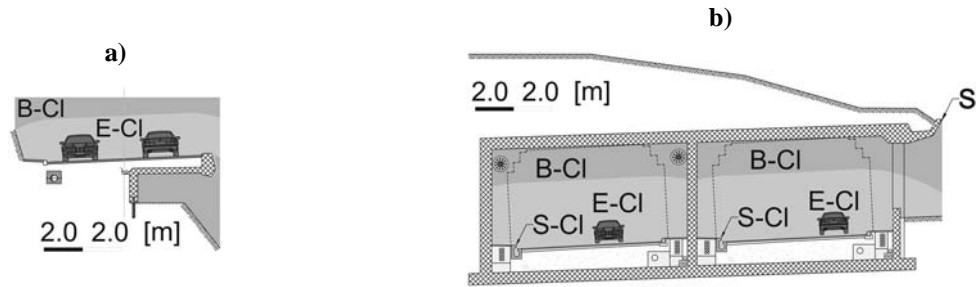


FIGURE 2.12: a) Profil type d'un encorbellement sur une route cantonale dans un terrain en pente avec les différentes zones d'exposition pour une vitesse des véhicules à 80 [km/h], plan de base tiré de [Cert04], b) Profil type d'une tranchée couverte et d'une galerie ouverte avec les différentes zones d'exposition pour une vitesse des véhicules à 100 [km/h], plan de base tiré de [Tobola04].

### 2.3.3.3 Zones d'exposition des tranchées couvertes et des tunnels

Les surfaces de béton extérieures de ces ouvrages sont en contact avec le terrain naturel. A l'intérieur, il se peut également que la partie sous la chaussée soit remblayée par du terrain naturel. Toutes ces zones ont déjà été traitées au paragraphe précédent (§ 2.3.3.2).

Pour les surfaces, hors contact avec le terrain naturel, les considérations longitudinales doivent être prises en considération. Dans les zones proches des portails, soit sur les cent à deux cents mètres de part et d'autre des extrémités pour des voies de circulation bidirectionnelle, les zones d'éclaboussures y sont plus importantes que pour des tranchées ou tunnels de grande longueur [Ungricht04]. En cas de circulation unidirectionnelle, le portail d'entrée seul est touché par cette zone d'éclaboussures. Le solde des surfaces se trouve en zone d'exposition au brouillard salin. Cependant selon les conditions de ventilation du tunnel ou de la tranchée couverte, il se peut qu'une concentration importante d'humidité se produise à l'intérieur de tels ouvrages (Figure 2.12 b, Figure 2.13).

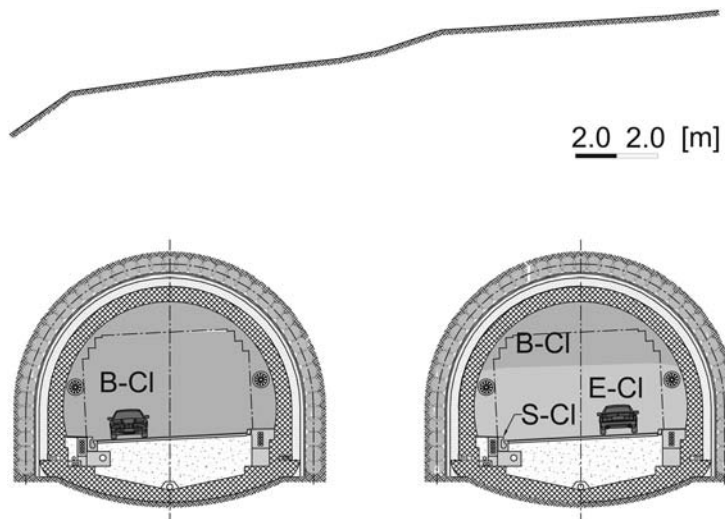


FIGURE 2.13: Profil type d'un tunnel proche d'un portail avec les différentes zones d'exposition pour une vitesse des véhicules à 100 [km/h], plan de base tiré de [Tobola04].

### 2.3.3.4 Zones d'exposition des bâtiments

Pour les bâtiments, l'exposition dépend de sa situation géographique par rapport aux voies de circulation. Concernant les bâtiments isolés situés hors d'un trafic routier important, la zone d'exposition au brouillard suffit. Il est assez rare que des bâtiments se situent directement aux abords d'une route à grand débit. Généralement, la zone d'exposition brouillard salin convient pour représenter les secteurs

touchés sur des bâtiments situés en bordure de voies de circulation. Cependant si les limites des zones de construction par rapport à la chaussée ne sont pas respectées, il est possible d'avoir une zone exposée aux éclaboussures (Figure 2.8).

Dans les zones d'accès aux parkings et les parkings, il est possible de schématiser des zones d'exposition aux eaux stagnantes et aux éclaboussures salines, en se basant sur le mode d'évacuation des eaux, la capacité du parking. Dans cette situation, les zones d'expositions aux éclaboussures restent limitées par les vitesses généralement basses des véhicules (0 à 30 [km/h]). Des zones d'exposition aux eaux stagnantes peuvent exister en cas de mauvais dispositifs d'évacuation des eaux.

## 2.4 Modélisation du microclimat

La modélisation du microclimat permet de définir le microclimat sur chaque segment de l'ouvrage, obtenu par l'approche segmentielle (§ A.3.5). Ce modèle s'élabore à partir des données mesurées par une station météorologique. Le pas de temps d'une heure est utilisé.

Lorsque les conditions climatiques sont connues à l'interface air-béton, il est alors possible de préciser les conditions de bord pour différents modèles de transports élaborés afin de connaître les détériorations des bétons pendant leur durée de service. Ces conditions de bord sont utiles dans le cadre de ce travail pour déterminer les modes de transport des chlorures, de transports hydrique et thermique (Figure 2.14).

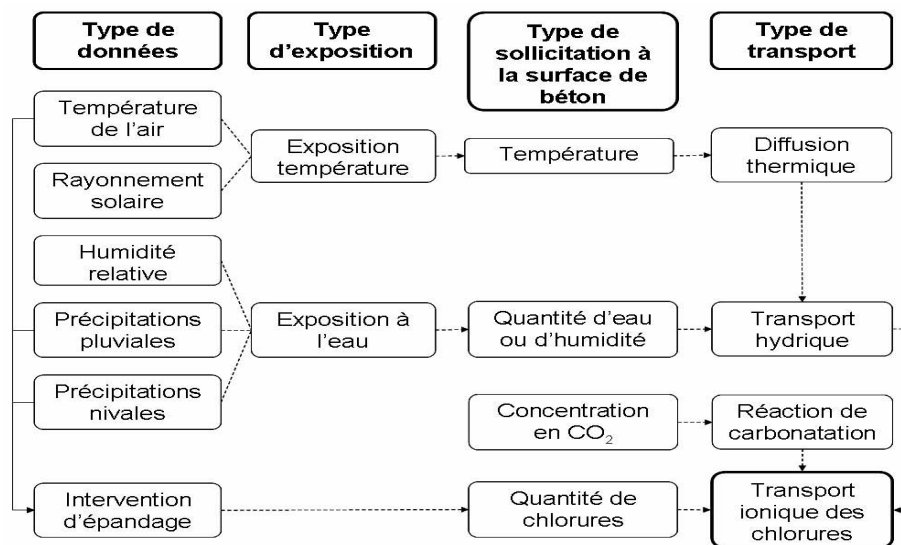


FIGURE 2.14: Schéma de la modélisation du microclimat.

### 2.4.1 Expositions aux pluies et à l'ensoleillement

Les mesures de la température par les stations météorologiques se font dans un abri aéré, protégé des radiations solaire et surélevé par rapport au sol. La surface du béton réfléchit et absorbe les radiations du rayonnement solaire. Cette partie absorbée se transforme en énergie thermique en augmentant la température dans la masse du béton (EQ. 2.5, EQ. 2.6) [Duracrete99]. Dans la modélisation du microclimat, il est alors possible de subdiviser des zones protégées ainsi que des zones directement exposées à l'ensoleillement.

$$T_{\text{surf}} = T_{\text{air}} + \frac{a \cdot I}{h_y} \quad (\text{EQ. 2.5})$$

$$I = \frac{E_{sol}}{t} \quad (EQ\ 2.6)$$

$T_{surf}$	[°C] température à l'interface air-béton,
$T_{air}$	[°C] température de l'air mesurée par une station météorologique,
$a$	[-] facteur d'absorption de radiation, pour le béton sa valeur est de 0.6 - 0.7,
$I$	[W/m <sup>2</sup> ] rayonnement global,
$h_y$	[W/m <sup>2</sup> K] coefficient de transfert thermique, béton : 20,
$E_{sol}$	[Wh/m <sup>2</sup> ] puissance horaire par unité de surface fournit par le soleil,
$t$	[h] intervalle de temps, dans ce cas (EQ. 2.6) (1 heure).

Pour obtenir une augmentation de température maximale, le facteur d'adsorption prend la valeur de 0.7. Par exemple, cette augmentation de température peut atteindre une différence de température de 31.5°C, si le rayonnement solaire vaut environ 900 [W/m<sup>2</sup>].

L'effet du vent est négligé dans ce modèle. Sa prise en compte nécessite une étude plus approfondie afin de déterminer l'influence du vent sur l'humidité relative et sur les modifications thermiques locales.

L'exposition de l'ouvrage à la vapeur d'eau et aux précipitations a été classée en trois catégories (§ A.3). L'important dans le modèle est de différencier la présence d'eau liquide de la présence de vapeur d'eau. Les conditions d'exposition, l'humidité relative et les périodes de précipitations mesurées par les stations météorologiques permettent de les différencier. La présence d'eau liquide est considérée dans le modèle par une valeur de 100%, tandis que si l'air est saturé de vapeur d'eau, sa valeur maximale ne dépasse jamais 99.9%.

#### **a) Exposition aux eaux stagnantes.**

Les conditions d'exposition sont égales à l'humidité relative de l'air en période sèche. Le contact avec l'eau sous forme liquide s'établit dès qu'une précipitation s'initie. Si la précipitation se termine durant la nuit (entre 18h00 et 06h00), la surface demeure en contact avec l'eau jusqu'au matin (06h00). Cette hypothèse tient compte d'une possible stagnation d'eau et d'un séchage lent durant la nuit. En dehors de ces heures, le contact avec l'eau sous forme liquide s'interrompt dès la fin de la précipitation. La durée de séchage d'une partie d'ouvrage exposée aux eaux stagnantes comporte une grande variabilité si l'on considère des défauts d'étanchéité sur une dalle de roulement, dans les joints de dilatation, etc. Ces cas ne sont pas pris en considération dans cette étude.

#### **b) Exposition aux éclaboussures.**

Les conditions d'exposition sont égales à l'humidité relative de l'air en période sèche. La surface est supposée être en contact avec l'eau, sous forme liquide, une heure après le début d'une précipitation. Ce délai d'une heure se justifie en considérant qu'il faut un certain film d'eau sur la chaussée pour qu'il y ait des éclaboussures importantes sur la partie d'ouvrage concernée. Le contact avec l'eau sous forme liquide s'interrompt à la fin de la précipitation.

#### **c) Exposition au brouillard.**

Les conditions d'exposition sont égales à l'humidité relative de l'air. Aucun contact avec l'eau sous forme liquide n'est considéré. Ceci correspond aux zones d'ouvrages protégés des intempéries. Cependant selon le niveau de protection aux intempéries, les fluctuations de l'humidité relative et de la température de l'air peuvent être prises en compte (§ 2.4.2).

### **2.4.2 Modélisation de l'exposition au brouillard sur les ponts routes**

Les paramètres du modèle suivant sont valides seulement pour des données météorologiques mesurées avec un intervalle de temps d'une heure, car l'atténuation est une constante. En faisant le rapport

des différences de température ou d'humidité relative de chaque intervalle mesurée par le capteur avec celles mesurées par la station météorologiques sur le pont de la Denève (§ 2.3.2), et en comparant avec les différences de température de chaque intervalle mesurées par la station météorologique, un nuage de points s'organise de manière ordonnée (Annexe D, Figure 2.15).

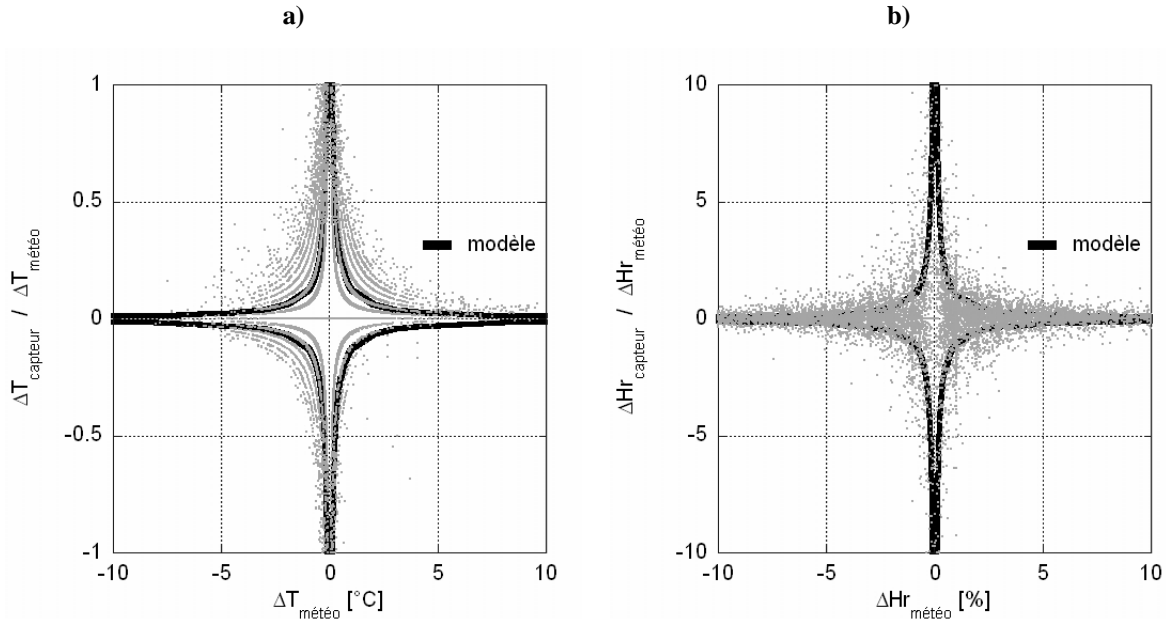


FIGURE 2.15: Nuage de points et modèle pour le traitement des données météorologiques dans les caissons, a) données de température, b) données d'humidité relative.

A ce nuage de points, une fonction homographique a été calée, pour les températures (EQ. 2.7) et pour l'humidité relative (EQ. 2.10).

$$\frac{\Delta T_{\text{capteur}}}{\Delta T_{\text{météo}}} = \pm \frac{\gamma}{\Delta T_{\text{météo}}} \quad (\text{EQ. 2.7})$$

$$\frac{\Delta Hr_{\text{capteur}}}{\Delta Hr_{\text{météo}}} = \pm \frac{\gamma}{\Delta Hr_{\text{météo}}} \quad (\text{EQ. 2.8})$$

$\Delta T_{\text{capteur}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] différence de température de l'air mesurée avec un capteur,

$\Delta T_{\text{météo}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] différence de température de l'air mesurée avec une station météorologique,

$\Delta Hr_{\text{capteur}}$  [%] différence d'humidité relative dans l'air mesurée avec un capteur,

$\Delta Hr_{\text{météo}}$  [%] différence d'humidité relative dans l'air mesurée avec une station météorologique,

$\gamma$  [ $^{\circ}\text{C}$  ou %] paramètre de la fonction homographique.

A chaque intervalle de temps, un incrément de température ou d'humidité relative est ajouté à la valeur de température ou d'humidité relative de l'intervalle précédent (EQ. 2.9). Cette équation (EQ. 2.9) revient au même que d'ajouter une constante  $\beta$ . Ce choix de représentation permet de mieux visualiser la modélisation de ces données (Annexe D).

$$T_i = T_{i-1} \pm \left( \frac{\gamma}{\Delta T_{\text{météo}}} \cdot \Delta T_{\text{météo}} \right) \quad \text{ou} \quad Hr_i = Hr_{i-1} \pm \left( \frac{\gamma}{\Delta Hr_{\text{météo}}} \cdot \Delta Hr_{\text{météo}} \right) \quad (\text{EQ. 2.9})$$

$T_i, T_{i-1}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] température de l'air à l'instant  $i$ , respectivement à l'instant  $i-1$ ,



$Hr_i, Hr_{i-1}$  [%] humidité relative de l'air à l'instant  $i$ , respectivement à l'instant  $i-1$ .

Les points  $z_{\max}$  et  $z_{\min}$  représentent deux points d'extremum provenant des données météorologiques évoluant dans le temps  $t$ . La différence entre ces deux points fournit un intervalle entre ces deux extrema, appelé  $\Delta z$ . Le point  $z_p$  se situe entre ces deux extrema à une distance du paramètre  $\alpha$  multiplié par l'intervalle entre les deux extrema (Figure 2.16). La position, par rapport à  $z_p$ , détermine le signe des équations (EQ. 2.7 à EQ. 2.9). Si la position de  $T_i$  ou  $Hr_i$  est supérieure, le signe est négatif, alors que si elle est inférieure, le signe est positif. La position relative de  $z_p$  s'obtient en multipliant un facteur  $\alpha$  par la différence entre deux extrema, puis additionné par le minimum de ces deux extrema.

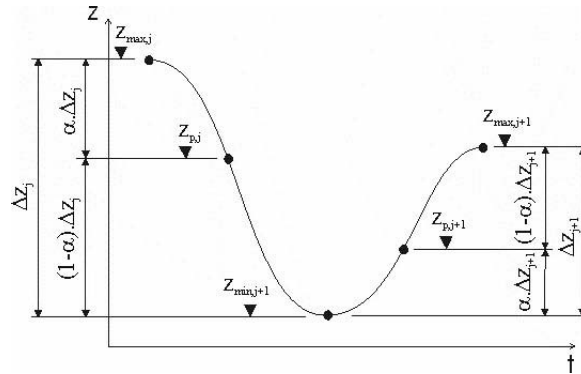


FIGURE 2.16: Schéma d'un tronçon provenant de données météorologiques de température ou d'humidité relative, avec 3 extrema, définition de la position  $z_p$ .

- $z_{\max,j}$  paramètre de données des stations météorologiques se situant sur un extremum positif local,
- $z_{\min,j}$  paramètre de données des stations météorologiques se situant sur un extremum négatif local,
- $\alpha$  paramètre d'optimisation pour le modèle, permettant d'obtenir la position de  $z_p$ ,
- $z_p$  paramètre de position, permettant d'obtenir le signe positif ou négatif du modèle,
- $\Delta z$  intervalle entre deux extrema locaux.

Les paramètres  $\alpha$  et  $\gamma$  sont identiques pour les mesures effectuées au-dessus du plan d'eau et sous la dalle de roulement. Ces paramètres montrent une amplification plus importante pour les caissons. Pour les mesures effectuées au-dessus d'un plan d'eau, il faut toutefois ajouter 5 à 10 heures de séchage après une averse, c'est-à-dire garder la même humidité relative pendant les 5 à 10 heures suivant une précipitation (Tableau 2.3).

Situation	Température de l'air			Humidité relative de l'air		
	$\alpha$	$\beta$ [°C]	Variation [°C]	$\alpha$	$\beta$ [%]	Variation [%]
<b>Dans les caissons</b>	1/3	8	1.26±1.01	2/3	1	7.46±6.21
<b>Sous la dalle de roulement</b>	1/3	2	3.18±1.94	2/3	4	7.12±5.14
<b>Au-dessus d'un plan d'eau</b>	1/3	2	4.48±2.75	2/3	4	13.6±13.1

TABLEAU 2.3: Valeurs des paramètres du modèle pour différentes situations (§ 2.3.2), avec la variation de l'écart entre les résultats du modèle et des capteurs, moyenne et écart type de cet écart.

Ce modèle fonctionne avec une très bonne représentativité pour les données météorologiques de température de l'air. La colonne variation (Tableau 2.3) représente la moyenne et l'écart type des écarts entre la modélisation et les mesures effectuées par les capteurs sur le pont. Elle est légèrement moins précise pour les données météorologiques de l'humidité relative de l'air (Annexe D) que pour les températures.

### 2.4.3 Epandage de produits de déverglaçage

La quantité de chlorure de sodium annuelle, épandue en période hivernale, dépend essentiellement de la rigueur de l'hiver (EQ. 2.1). Pour connaître le nombre d'interventions annuelles d'épandage de chlorure de sodium, il suffit de connaître la consommation annuelle de chlorure de sodium et les quantités de chlorure de sodium déversé à chaque passage de l'épandeuse (EQ. 2.10). Le facteur humain rend difficile l'obtention de la quantité moyenne déversée à chaque passage de l'épandeuse (§ A.2.5). Pour les installations automatiques de salage, les quantités déversées s'élèvent de 10 à 50 fois moins que par les moyens mécaniques (§ A.2.5).

$$n_{\text{int}} = \frac{q_{\text{NaCl}}}{E_{\text{NaCl}}} \quad (\text{EQ. 2.10})$$

- $n_{\text{int}}$  nombre d'interventions annuelles moyennes d'épandage de chlorure de sodium,
- $q_{\text{NaCl}}$  [kg/m<sup>2</sup>] quantité surfacique moyenne annuelle d'épandage de chlorures de sodium (Figure 2.2),
- $E_{\text{NaCl}}$  [kg/m<sup>2</sup>] quantité surfacique d'épandage de chlorures de sodium, lors du passage de l'épandeuse.

#### 2.4.3.1 Simulation de l'instant de passage de la saleuse

Connaissant le nombre moyen annuel d'interventions de l'épandeuse, il est possible de simuler dans un modèle, l'instant des interventions d'une épandeuse, ceci également en fonction du microclimat de la station météorologique. Ces interventions dépendent de la présence d'une précipitation nivale (§ 2.4.4) ou par temps sec, de la présence d'un taux d'humidité relative de l'air élevé accompagné par des conditions de température basse. Il faut également un certain temps pour que la saleuse intervienne à nouveau sur le même ouvrage, ce paramètre est également pris en considération. Ces conditions d'humidité de l'air élevée et de température basse sont fixées par une frontière appelée respectivement humidité relative seuil et température seuil.

Une intervention a lieu également lorsque l'atmosphère est très humide (humidité relative avoisinant les 90 à 99.9%) ou lors de précipitation pluviale, avec température en-dessous d'une température seuil. La température seuil s'obtient par un processus itératif : le nombre d'interventions d'épandage, obtenus sur la base de quantités de produits de déverglaçage déversés annuellement (EQ. 2.10), est comparé au nombre d'interventions d'épandages, obtenues selon les conditions météorologiques de manière itérative (la température seuil varie jusqu'à ce que le nombre d'intervention coïncide avec le nombre d'intervention de l'EQ. 2.10). L'humidité relative seuil est fixée par défaut à 95% dans le modèle.

Régions (station)	Epandage moyen annuel de NaCl [g/m <sup>2</sup> ]	Nombre d'interventions, moyennes annuelles	Température seuil [°C]
Alpes (Guetsch)	3001	300	1.8
(Grand-Saint-Bernard)	3499	350	0.8
Grisons (Davos)	1497	150	0.8
Tessin (Lugano)	231	23	3.7
(Locarno-Monti)	237	24	2.4
Lémanique (Pully)	415	42	3.5
Valais (Sion)	372	37	1.6
Plateau (Kloten)	692	69	1.4
Pont sur la Denève (Vaud)	440	44	-0.5

TABLEAU 2.4: Résultats principaux du modèle simulant le microclimat et l'instant d'intervention de l'épandeuse dans différentes régions en Suisse (intervalle minimal entre deux interventions : 8 heures, humidité relative minimale : 95%, épaisseur du film d'eau en cas de pluie : 2 [mm], concentration de chlorure de sodium dans l'eau lors de l'épandage : 36%, quantité déversée lors du passage de la saleuse : 10 [g/m<sup>2</sup>]).

L'intervalle de temps, entre deux interventions, dépend de la sévérité des conditions climatiques. Il peut se produire quelques heures, voire même une trentaine de minutes entre deux interventions d'épandage [Emonet04]. Dans le modèle, le cas usuel et moyen est utilisé, c'est-à-dire pas d'intervention suivant les huit heures après la dernière intervention. Ces huit heures correspondent à un maximum de trois interventions par jour. En prenant en compte de toutes ces hypothèses, il est possible de connaître la quantité de chlorure de sodium moyenne annuelle épandue, le nombre moyen annuel d'interventions et également la valeur de la température seuil (Tableau 2.4).

Pour les zones d'intervention d'épandage automatique de produit de déverglaçage, l'intervalle entre deux giclages peut être très court (quelques minutes). Par contre, son déclenchement est régulé par les mesures des capteurs incorporés dans la chaussée. Le déclenchement d'un giclage s'effectue toujours en prenant en considération une température seuil et un niveau d'humidité minimale sur la chaussée, comme décrit précédemment. Une période de privation de giclage correspond à un taux de concentration de chlorure de sodium sur la chaussée supérieure à 10% de la concentration maximale déversée au dernier giclage. Le pas de temps horaire ne permet pas de tenir en compte de tous les giclages effectués sur cette plage horaire. Aussi faut-il estimer un nombre de giclages moyens durant l'intervalle horaire par un nouveau paramètre. Pour un fichier météorologique usuel, l'intervalle de temps horaire vaut une heure et le nombre de giclages moyens s'élève à environ 12 giclages par heure. En prenant en compte toutes ces hypothèses, il est possible de connaître la quantité de chlorure de sodium moyenne annuelle épandue, le nombre moyen annuel de giclages et également la valeur de la température seuil (Tableau 2.5). La régression linéaire (Figure 2.2 b) donne, pour le canton du Tessin (Lugano et Locarno-Monti), des consommations annuelles de chlorures de sodium négatives. Le climat doux du canton du Tessin démontre bien l'inutilité de planifier des installations automatiques de salage dans cette région.

Régions (station)	Epandage moyen annuel de NaCl [g/m <sup>2</sup> ]	Nombre d'interventions, moyennes annuelles	Température seuil [°C]
Alpes (Guetsch)	2717	453	2.7
(Grand-Saint-Bernard)	3215	536	-0.3
Grisons (Davos)	1213	202	1
Tessin (Lugano)	0	-	-
(Locarno-Monti)	0	-	-
Lémanique (Pully)	131	22	1.3
Valais (Sion)	87	14	0.3
Plateau (Kloten)	407	68	3.1
Pont sur la Denève (Vaud)	156	26	-4.3

TABLEAU 2.5: Résultats principaux du modèle simulant le microclimat et l'épandage de produits de déverglaçage par des moyens automatisés dans différentes régions en Suisse (nombre moyen de giclages en 1 heure : 12, humidité relative minimale : 95%, épaisseur du film d'eau en cas de pluie: 2 [mm], concentration de chlorure de sodium dans l'eau lors de l'épandage: 21%, quantité de chlorure de sodium épandue par giclage: 0.5 [g/m<sup>2</sup>]).

#### 2.4.3.2 Evaluation de la concentration en chlorures de sodium sur la chaussée

La concentration en chlorure de sodium sur la chaussée dépend de la présence ou non d'un film d'eau au moment de l'épandage. L'évolution de la concentration en chlorure de sodium dans le temps dépend des précipitations nivales ou pluviales et de la géométrie de la chaussée. Au moment de l'intervention, trois cas de figure peuvent se présenter : film d'eau sur la chaussée sans présence de chlorure de sodium, film d'eau sur la chaussée avec présence de chlorure de sodium et chaussée sèche. L'épaisseur de ce film d'eau dépend de l'intensité de la précipitation, des pentes du dévers et des pentes longitudinales ainsi que de la nature du revêtement. Cette épaisseur varie usuellement entre 1 et 2 [mm]. Pour le modèle, 2 [mm] de hauteur d'eau est utilisé.

L'utilisation de la saumure reste encore limitée aux routes à grands débits. La plupart du temps, l'épandage des chlorures de sodium s'effectue sous forme solide. La concentration maximale à saturation de chlorure de sodium dans l'eau est de 36%, si l'on augmente cette concentration, les chlorures de

sodium en surplus précipitent. Ainsi, lorsque l'épandage s'effectue sous forme solide, il est nécessaire d'avoir une certaine quantité d'eau présente pour dissoudre tous les chlorures de sodium sous forme solide présents sur la chaussée. Si l'épandage s'effectue sur une chaussée sèche ou légèrement humide, la concentration sera maximale (EQ. 2.11). Par contre, si l'épandage se déroule sous forme de saumure, sa concentration maximale sur une chaussée sèche ou légèrement humide dépend uniquement de la concentration de saumure contenue dans l'épandeuse (EQ. 2.12). La saumure est toujours utilisée pour les installations automatiques de salage, les concentrations de chlorure de sodium dans l'eau s'élève à 21% pour le contournement de Lausanne dans le canton de Vaud [Blaser05] ainsi que pour le pont de Flamatt dans le canton de Fribourg [Gambera05] et 18% pour le pont des Aigues-Vertes à Genève [Rodriguez05].

Par contre lors de la présence d'un film d'eau sur la chaussée, les chlorures de sodium sous forme solide vont se dissoudre dans l'eau et se transformer en saumure avec une concentration de chlorure dans l'eau ne dépassant toutefois pas la valeur maximale de 36% (EQ. 2.13). Pour l'épandage d'une saumure en présence d'un film d'eau sur la chaussée, cette saumure va se diluer dans le film d'eau présent (EQ. 2.13).

$$C_o = 0.36 \quad \text{si la chaussée est sèche avec un épandage solide} \quad (EQ. 2.11)$$

$$C_o = C_{\text{epandeuse}} \quad \text{si la chaussée est sèche avec un épandage de saumure} \quad (EQ. 2.12)$$

$$C_o = \frac{E_{\text{NaCl}}}{\rho_w \cdot h_{\text{film}}} \quad \text{si la chaussée présente un film d'eau} \quad (EQ. 2.13)$$

$C_o$  [-] rapport massique entre les chlorures de sodium et l'eau liquide, appelé également concentration en chlorure de sodium de la saumure,

$C_{\text{epandeuse}}$  [-] concentration en chlorure de sodium de la saumure dans l'épandeuse,

$h_{\text{film}}$  [m] hauteur du film d'eau présent sur la chaussée.

L'évolution temporelle de la concentration de saumure sur la chaussée dépend directement de la quantité d'eau précipitée sur la chaussée qui occasionne plus ou moins de dissolution des chlorures de sodium dans l'eau (EQ. 2.14). Le modèle tient compte de la concentration en chlorure de sodium lors du pas précédent avec un film d'eau présent également au pas précédent.

$$C_{o,i} = \frac{C_{o,i-1} \cdot h_{\text{film}}}{h_{\text{film}} + \sum h_{\text{pluie}}} \quad (EQ. 2.14)$$

$C_{o,i}$  [-] rapport massique entre les chlorures de sodium et l'eau liquide incrémenté dans le temps avec la position  $i$ ,

$h_{\text{pluie}}$  [m] hauteur d'eau précipitée durant l'intervalle de temps débutant par l'épandage de chlorure de sodium jusqu'au temps délimité par  $i$ .

#### 2.4.4 Précipitations nivales

Les stations météorologiques mesurant les précipitations nivales ou les hauteurs de neige le font toutes les douze heures, mais ces stations sont assez rares. La modélisation avec un intervalle d'une heure impose de connaître si la précipitation est nivale ou pluviale durant cette courte période. Les précipitations nivales se produisent également à des températures supérieures à 0°C. Elles peuvent se produire jusqu'à des températures de 5 à 6°C (Figure 2.17). Ces valeurs dépendent essentiellement du gradient thermique de l'atmosphère en fonction de l'altitude. Le flocon de neige, atteignant l'isotherme de 0°C

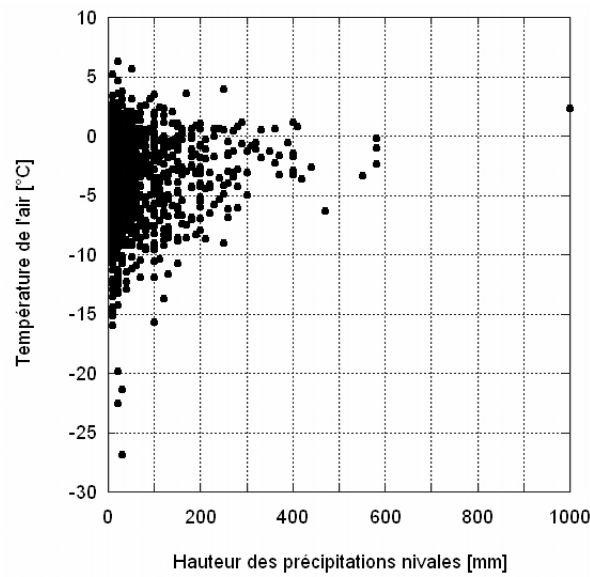


FIGURE 2.17: Hauteur de neige mise en relation avec la température de la station d'Hinterrhein, données brutes de [MétéoSuisse04].

ne se transforme pas immédiatement en gouttes de pluie. Sa fusion lente permet de trouver des flocons de neige à environ 300 mètres au-dessous de cette isotherme [Bolognesi02]. Dans le modèle, la valeur limite de température entre pluie et neige est fixée à 4°C.

Il est également possible de transformer la hauteur d'eau précipitée en hauteur de neige précipitée. Cette transformation est directement corrélée avec la température de l'air au moment de la précipitation (EQ. 2.15, EQ. 2.16) [Sevruk86].

$$\rho_{\text{neige}} = 3 \cdot T_{\text{air}} + 110 \quad \text{si} \quad T_{\text{air}} \leq -1[^\circ\text{C}] \quad (\text{EQ 2.15})$$

$$\rho_{\text{neige}} = 23 \cdot T_{\text{air}} + 130 \quad \text{si} \quad 5[^\circ\text{C}] \geq T_{\text{air}} > -1[^\circ\text{C}] \quad (\text{EQ 2.16})$$

$$\frac{\partial}{\partial V}[\rho_w(T_{\text{air}})] \ll \frac{\partial}{\partial V}[\rho_{\text{neige}}(T_{\text{air}})] \quad (\text{EQ 2.17})$$

$$\frac{\rho_w(T_{\text{air}})}{\rho_{\text{neige}}(T_{\text{air}})} = \frac{1000}{\rho_{\text{neige}}(T_{\text{air}})} \quad (\text{EQ 2.18})$$

$T_{\text{air}}$  [°C] température de l'air mesurée par une station météorologique,

$\rho_{\text{neige}}$  [kg/m<sup>3</sup>] masse volumique de la neige,

$\rho_w$  [kg/m<sup>3</sup>] masse volumique de l'eau,

$V$  volume.

La variation volumique de l'eau due à la température est négligeable par rapport à celle de la neige [Sevruk86] (EQ. 2.17). Ainsi la masse volumique est considérée comme constante et vaut 1000 [kg/m<sup>3</sup>]

(EQ. 2.18). En considérant une surface de 1 [m<sup>2</sup>], la hauteur de neige (EQ. 2.19) peut ainsi être obtenue par l'intermédiaire de l'équation précédente (EQ. 2.18) [Zaugg04].

$$h_{\text{neige}} = h_{\text{pluie}} \cdot \frac{1000}{\rho_{\text{neige}}(T_{\text{air}})} \quad (\text{EQ 2.19})$$

$h_{\text{pluie}}$  [mm] hauteur de pluie mesurée dans une station météorologique,

$h_{\text{neige}}$  [mm] hauteur de neige obtenue par le modèle.

## 2.5 Conclusions

1. *Le territoire suisse peut être divisé en six zones climatiques distinctes, soit les Alpes, les Préalpes (englobant les régions climatiques du Jura et de l'Engadine), la plaine du Tessin, le plateau suisse, l'arc lémanique et la plaine du Rhône. Cette division est validée à travers une étude, tirée des données de stations météorologiques.*
2. *Les volumes annuels de produits de déverglaçage déversés sur les chaussées par des moyens mécaniques ou une installation automatique de salage s'obtient avec précision par l'intermédiaire du nombre de jours hivernaux, calculé à partir des données des stations météorologiques.*
3. *L'évolution des précipitations, le volume déversé par l'épandeuse et l'instant d'épandage sont les paramètres prépondérants pour connaître l'évolution de la concentration de produits de déverglaçage sur la chaussée. Ces paramètres ont été mis en évidence par des mesures périodiques sur la chaussée d'un ouvrage.*
4. *Une modélisation est proposée pour déterminer des gabarits de zones d'éclaboussures en fonction de la vitesse des véhicules, afin de donner une définition précise des zones d'exposition des ouvrages au microclimat et aux produits de déverglaçage (l'exposition aux eaux stagnantes, aux éclaboussures et au brouillard). Ainsi, la variabilité spatiale de l'exposition est insérée dans une approche segmentielle.*
5. *Les données d'une station météorologique sont transformées en condition de bord (thermique, hydrique et d'ions chlorures) du modèle de transport TransChlor. Ces transformations dépendent de l'ensoleillement et de l'exposition d'un élément d'ouvrage, ainsi que du nombre de jours hivernaux pour l'ensemble de l'ouvrage. L'exposition au brouillard est affiné à travers un modèle, tiré du monitoring d'un pont route.*

### 3 Mouvements ioniques des chlorures dans le béton

*Ce chapitre expose les différents mouvements de corps étranger dans le béton d'enrobage par l'intermédiaire d'un modèle de transport nommé TransChlor, soit la température, la carbonatation, le transport d'eau et le transport ionique des chlorures. Ainsi, le modèle de transport TransChlor prend en considération des données météorologiques (température, humidité relative de l'air, précipitations) et la présence de produits chimiques contenant du chlore, et prédit l'évolution temporelle et spatiale du transfert thermique, du gaz carbonique, des mouvements de vapeur d'eau et d'eau liquide et des ions chlorures dans les pores du béton d'enrobage (§ 3.1).*

*Une campagne expérimentale étaye le modèle TransChlor en apportant des précisions sur le mouvement de l'eau liquide par succion capillaire. L'objectif principal de la campagne expérimentale est de représenter au mieux les bétons conventionnels utilisés sur les chantiers aussi que de représenter les conditions de microclimat local. Aussi, les essais de capillarité ont été entrepris sur des éprouvettes de plusieurs perméabilités différentes du béton et à basses températures (§ 3.2). La multiplicité des éprouvettes a permis d'obtenir les résultats sous forme de loi probabiliste, concept repris dans le prochain chapitre (§ 4).*

*La validation du modèle TransChlor a été effectuée pour les modes de transport par des comparaisons avec des essais tirés de la littérature, par nos propres essais et/ou en utilisant les paramètres publiés dans des articles (§ 3.1). La validation du transport ionique des ions chlorures entraîné par l'eau sous forme de succion capillaire est tout à fait innovante puisqu'elle regroupe deux travaux de recherche effectués en parallèle. Dans cet autre travail de recherche, la mise en évidence du transport d'eau par capillarité a été réalisée par le développement d'un capteur d'ions chlorures à fibre optique couplé à l'utilisation de l'une des recettes de béton développée dans ce travail de recherche (§ 3.1.5.1 et § 3.1.6.3).*

*Enfin, des simulations mettent en évidence les différents paramètres microclimatiques et chimiques (comme le type d'exposition, l'exposition à l'ensoleillement, la concentration en gaz carbonique, la situation géographique de l'ouvrage en Suisse, le type d'épandage), la perméabilité du béton, la qualité et l'épaisseur de l'enrobage des aciers d'armature et la résistance des aciers face à la présence des ions chlorures. Chaque mode de transport est étudié à travers ces paramètres (§ 3.3).*

#### 3.1 Diffusion thermique, transport hydrique et ionique des chlorures

Le but recherché de ce modèle est d'établir l'instant d'initiation de la corrosion des aciers d'armature tout en considérant le microclimat réel sur les structures (§ A.3). Les bases d'un modèle numérique de transferts thermique, hydrique et ionique, nommé TransChlor, sont développées dans ce paragraphe. Ce modèle a été créé à partir d'un modèle existant [Roelsfstra00]. Les nouveaux apports dans le modèle TransChlor ont été les suivants.

- la prise en considération du transport thermique,
- un nouveau modèle de transport d'eau liquide par capillarité,
- de la prise en compte de la relation entre la teneur en eau et l'humidité relative en fonction de l'isotherme d'adsorption ou de désorption,
- du transport des ions chlorures par l'eau tout en garantissant la conservation des masses,
- de la carbonatation
- et de la prise en considération des ions chlorures libres et liées en fonction du taux de carbonatation.

En plus de tenir compte de la diffusion des ions chlorures dans l'eau, l'originalité de ce modèle est de prendre en considération le transport par l'eau des ions chlorures. Ainsi, un nouveau modèle complète la diffusion de la vapeur d'eau dans le béton, la succion capillaire sous l'effet de l'eau liquide provenant des précipitations.

Le pas de temps choisi dans les simulations est d'une heure. Ce pas de temps est insuffisant si l'on cherche à obtenir des profils de température précis, par contre il permet de bien prendre en considération les périodes de précipitations qui occasionnent des mouvements importants d'ions chlorures dans le béton d'enrobage. Si l'on augmente cet intervalle de temps, les périodes de précipitations en seront accentuées, ce qui surévalue le transport ionique. Ce pas de temps peut par contre diminuer, lorsque la fluctuation des conditions de bord est très importante. Cette diminution empêche une divergence de la solution. Les conditions de bord sont dès lors interpolées linéairement sur cet intervalle de temps.

### 3.1.1 Equations générales

Deux modes de transport modélisent le mouvement des ions chlorures dans le béton soit : la diffusion des ions chlorures dans l'eau, l'entraînement des ions chlorures par l'eau. Le deuxième mode de transport est une propagation rapide des ions chlorures dans le béton. Il est d'autant plus rapide, lorsque l'adsorption de l'eau liquide s'effectue par capillarité et lorsque l'exposition de l'élément d'ouvrage est particulièrement sévère.

Lorsque les ions chlorures s'acheminent dans le béton, une partie est capturée par la pâte de ciment selon les conditions thermiques et de carbonatation du béton. On distingue la partie capturée de la partie libre en les nommant respectivement ions chlorures liés et ions chlorures libres. La somme des deux est appelée ions chlorures totaux [Roelfstra00].

Le mode de propagation de l'eau sous forme liquide ou sous forme gazeuse se distingue également par deux modèles différents. L'eau sous forme de vapeur se diffuse dans les pores et s'équilibre avec son environnement extérieur. L'eau liquide s'introduit très rapidement dans le béton d'enrobage par un effet de capillarité appelé également succion capillaire. De plus, l'allure de la quantité d'eau présente en fonction de la profondeur dans le béton d'enrobage diffère. Pour la vapeur d'eau, l'allure se présente sous forme d'une courbe plutôt concave, alors que pour l'eau liquide, l'allure se présente sous forme d'une courbe convexe (Figure 3.1).

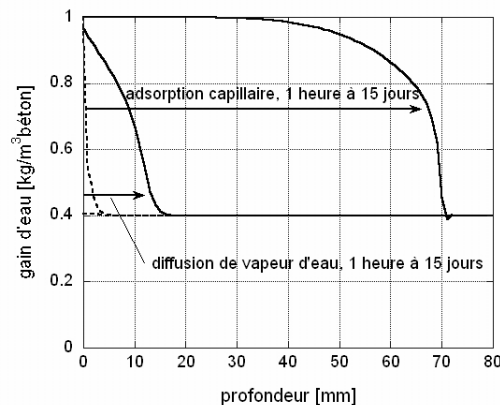


FIGURE 3.1: Visualisation de l'allure de l'humidité relative dans le béton d'enrobage en présence d'un transport d'eau par capillarité ou par diffusion de vapeur d'eau, simulation à partir d'un béton de type B.

En outre, la diffusion thermique et la carbonatation sont prises en considération pour affiner les deux modes de transports ionique et hydrique.

La formulation générale (EQ. 3.1) prend en considération tous les modes de transport, soit dans l'ordre (EQ. 3.2, EQ. 3.3) : la diffusion thermique, la carbonatation, le transport hydrique et finalement le transport ionique des chlorures. La première partie de la formulation (EQ. 3.1, EQ. 3.5) est une modélisation selon la loi de Fick, tandis que la deuxième partie est une modélisation de la succion capillaire (EQ. 3.1, EQ. 3.6). Le vecteur  $z$  est utilisé pour la réaction de carbonatation (EQ. 3.4).



$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = \text{div}(\mathbf{A} \cdot \vec{w}) - (\mathbf{C} \cdot \vec{w}) - \vec{z} \quad (EQ 3.1)$$

$$\vec{v} = \begin{Bmatrix} T \\ [\text{CO}_2] \\ H \\ C(B, T) \end{Bmatrix} \quad (EQ 3.2)$$

$$\vec{w} = \begin{Bmatrix} \overrightarrow{\text{grad}}(T) \\ \overrightarrow{\text{grad}}([\text{CO}_2]) \\ \overrightarrow{\text{grad}}(H) \\ \overrightarrow{\text{grad}}(C(B, T)) \end{Bmatrix} \quad (EQ 3.3)$$

$$\vec{z} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -(\epsilon_{\text{ini}} \cdot f_w \cdot r_{\text{CH}} + 3 \cdot r_{\text{CSH}} + 3 \cdot r_{\text{C3S}} + 2 \cdot r_{\text{C2S}}) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (EQ 3.4)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\lambda_T(T, f)}{c_T(w)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{D_B(\epsilon, H_{\text{ext}})}{\epsilon \cdot (1 - f)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_h(T, H) & 0 \\ 0 & 0 & R_{\text{Cl}} \cdot c_f(B) \cdot D_h(T) & D_{\text{Cl}, t} \end{bmatrix} \quad (EQ 3.5)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{\text{cap}} & 0 \\ 0 & 0 & R_{\text{Cl}} \cdot c_f(B) \cdot D_{\text{cap}} & 0 \end{bmatrix} \quad (EQ 3.6)$$

- $v$  vecteur représentant les quantités des différentes substances modélisées,  
 $w$  vecteur représentant la variation spatiale des différentes substances modélisées  
 $z$  vecteur prenant en considération la carbonatation,  
 $A$  matrice composée des différents coefficients de diffusion et d'autres coefficients,  
 $C$  matrice composée de coefficients de convection et d'autres coefficients,  
 $t$  [s] temps,  
 $f_w$  [-] rapport du volume du film d'eau sur la paroi des pores sur le volume du pore,

$\varepsilon$	[-]	volume des pores sur le volume total du béton,
$\varepsilon_{ini}$	[-]	porosité initiale avant les effets de l'hydratation et de la carbonatation,
$c_T$	[kJ/(m <sup>3</sup> .K)]	capacité calorifique rapportée à un mètre cube de béton,
$\lambda_T$	[W/(m.K)]	conductivité thermique du béton,
$T$	[°C]	température,
$[CO_2]$	[mol/m <sup>3</sup> air]	concentration molaire du gaz carbonique,
$D_B$	[mm <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion du gaz carbonique dans le béton,
$B$		prise en compte de la carbonatation,
$r_{CH}$	[mole/s.m <sup>3</sup> béton]	taux de réaction du gaz carbonique avec la portlandite,
$r_{CSH}$	[mole/s.m <sup>3</sup> béton]	taux de réaction moyen des silicates de tricalcium et dicalcium pour former des silicates de calcium hydraté,
$r_{C3S}$	[mole/s.m <sup>3</sup> béton]	taux de réaction des silicates de tricalcium,
$r_{C2S}$	[mole/s.m <sup>3</sup> béton]	taux de réaction des silicates de dicalcium,
$f$	[-]	teneur en eau, sans unité pour ces équations, rapportée à la masse volumique de l'eau,
$H_{ext}$	[-]	humidité relative atmosphérique moyenne depuis la confection d'un béton jusqu'au temps traité,
$H$	[-]	humidité relative dans les pores du béton,
$D_h$	[mm <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion de la vapeur d'eau,
$D_{cap}$	[mm/s]	coefficient de capillarité,
$R_{Cl}$		coefficient de retard,
$C$	[kg/m <sup>3</sup> ]	concentration en ions chlorures totaux rapportée au volume du béton,
$D_{Cl,t}$	[mm <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion des ions chlorures totaux,
$c_f$	[kg/m <sup>3</sup> ]	concentration en ions chlorures libres dans les interstices du béton rapportée au volume de la solution.

La résolution des équations différentielles utilise la méthode des éléments finis pour la modélisation du problème dans l'espace et la méthode des différences finies pour la modélisation du problème dans le temps. La modélisation développée avec le modèle TransChlor est à une dimension [Roelfstra00] (Annexes E.3.1, E.3.2 et E.3.3).

La grande rapidité du transfert thermique permet de le dissocier de toutes les dépendances aux autres modes de transport. L'inertie thermique et la quantité d'eau dans le béton sont prises en considération. Les valeurs du pas précédent sont utilisées pour le pas d'incrémentement suivant.

Le modèle de carbonatation est un modèle simplifié n'utilisant pas la méthode des éléments finis (Annexe E.5). Le modèle utilisé prend en considération la profondeur de carbonatation variant linéairement avec la racine du temps (§ 3.1.3). Toutefois dans les équations précédentes, la formulation basique est proposée (EQ. 3.1 à EQ. 3.6). L'utilisation d'un modèle simplifié est motivée par le fait que la carbonatation influence la capacité du ciment à capturer les ions chlorures mais que ce domaine est encore méconnu. La vitesse de carbonatation varie avec les conditions d'humidité de l'atmosphère environnante et les zones d'exposition (zone urbaine, de campagne, industrielle). La carbonatation est prise en considération pour l'évaluation du taux de chlorures libres et liées dans le béton. La température est également prise en considération, mais plutôt indirectement par le modèle de transport d'eau liquide et gazeuse.

Le transport d'eau liquide ou gazeuse dans le béton dépend des conditions de température dans l'élément de l'ouvrage. Une interaction avec les ions chlorures n'est pas prise en considération, car l'influence ionique est petite (§ A.5.4). La prise en considération de cette interaction nécessiterait de

paramétrer l'influence du taux d'ions chlorures pour l'avancement du front d'eau avec des essais. Le transport des ions chlorures interagit avec le mouvement de l'eau.

### 3.1.2 Diffusion thermique

Le transfert thermique est modélisé avec la deuxième loi de Fick prenant en considération deux paramètres : la capacité calorifique  $c_T$  et la conductivité thermique  $\lambda_T$  du béton (EQ. 3.7) [Hamfler88].

$$c_T(w) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda_T(T, w) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T)) \quad (\text{EQ } 3.7)$$

$c_T$  [kJ/(m<sup>3</sup>.K)] capacité calorifique rapporté au volume du béton,

$\lambda_T$  [W/(m.K)] conductivité thermique du béton,

$t$  [s] temps,

$T$  [°C] température,

$w$  [kg/m<sup>3</sup> béton] teneur en eau du béton.

#### 3.1.2.1 Les paramètres

La capacité calorifique de chaque composant du béton est prise en considération, soit la capacité calorifique des granulats, du ciment et de l'eau. La consommation de l'eau, pendant l'hydratation du ciment (§ A.4.1), est également prise en considération (EQ. 3.8) [Hamfler88].

$$c_T(w) = G \cdot c_S + C \cdot c_{CP} + w_i \cdot c_w - (0.2 \cdot C \cdot \alpha \cdot c_w) \quad (\text{EQ } 3.8)$$

$c_S$  [kJ/(kg.K)] capacité calorifique des granulats,

$c_{CP}$  [kJ/(kg.K)] capacité calorifique du ciment portland,

$c_w$  [kJ/(kg.K)] capacité calorifique de l'eau,

$\alpha$  [-] degré d'hydratation du béton,

$i$  indice de position dans le béton.

La capacité calorifique de l'eau est très importante par rapport aux granulats et au ciment (Tableau 3.1). La quantité d'eau varie très rapidement dans le béton d'enrobage, ceci motive une modélisation plus précise du transport d'eau dans le béton d'enrobage.

Composant	Capacité calorifique [kJ/(kgK)]
$c_S$ granulats siliceux	0.73
calcaire	0.84
chaux +calcaire	0.89
$c_w$	4.2
$c_{CP}$	0.84

TABLEAU 3.1: Capacité calorifique des différents composants des bétons [Larrard99].

La conductivité thermique tient compte d'une inertie thermique interne due à la température de l'eau. Ainsi la conductivité thermique dépend de la teneur en eau du béton et de sa température (Figure 3.2). Le modèle proposé est valide pour des températures supérieures à zéro degré Celsius, jusqu'à des températures de 80°C (EQ. 3.9, EQ. 3.10). En considérant les résultats de la littérature

[Hamfler88], ces deux équations sont obtenues avec une méthode d'interpolation d'une fonction continue par un polynôme : la méthode d'interpolation de Lagrange [Rappaz98].

$$\begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.899 & 3.368 \cdot 10^{-3} & -1.775 \cdot 10^{-4} & 3.195 \cdot 10^{-6} & -1.866 \cdot 10^{-3} \\ 1.502 \cdot 10^{-2} & -1.085 \cdot 10^{-3} & -4.893 \cdot 10^{-6} & 3.132 \cdot 10^{-7} & -2.668 \cdot 10^{-9} \\ -1.995 \cdot 10^{-3} & 7.170 \cdot 10^{-3} & -2.662 \cdot 10^{-4} & 3.634 \cdot 10^{-6} & -1.745 \cdot 10^{-8} \\ 9.336 \cdot 10^{-4} & -8.338 \cdot 10^{-4} & 3.100 \cdot 10^{-5} & -4.183 \cdot 10^{-7} & 1.978 \cdot 10^{-9} \\ -3.617 \cdot 10^{-5} & -2.26 \cdot 10^{-5} & -8.087 \cdot 10^{-7} & 1.046 \cdot 10^{-8} & -4.725 \cdot 10^{-11} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} (T_i)^0 \\ (T_i)^1 \\ (T_i)^2 \\ (T_i)^3 \\ (T_i)^4 \end{Bmatrix} \quad (EQ 3.9)$$

$$\lambda_{T,i}(T_i, f_i) = \sum_{j=1}^5 a_j \cdot (f_i)^{j-1} \quad (EQ 3.10)$$

- $f_i$  [%] teneur en eau, sans unité pour ces équations, rapporté à la masse volumique de l'eau,  
 $a_j$  paramètre intermédiaire pour le calcul de la conductivité thermique,  
 $i$  indice de position dans le béton,  
 $j$  indice des paramètres.

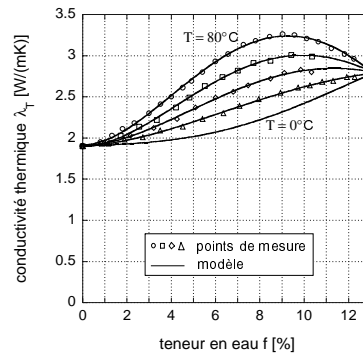


FIGURE 3.2: Conductivité thermique en fonction de la teneur en eau (sans unité, %) et de la température (80°C, 60°C, 40°C, 20°C, 0°C), interpolation tirée de points de mesure [Hamfler88].

Dans le modèle TransChlor, lorsque la température est inférieure à 0°C, la température de référence du modèle est maintenue à 0°C, car la teneur en eau n'influence pas la vitesse de transfert thermique dans le béton d'enrobage (§ 3.2.3.2). Ainsi la courbe isotherme à 0°C (Figure 3.2) correspond aux valeurs minimales d'un béton. La présence de chlorure de sodium dans la partie aqueuse modifie la température de changement de phase de la solution. La température de congélation diminue en fonction de la concentration de chlorures dans la solution (§ A.5.4). Une validation du modèle est proposée avec des essais en laboratoire effectués dans le cadre de ce travail de recherche (§ 3.2.3.2).

### 3.1.2.2 Comportement du modèle pour des éprouvettes soumises à des cycles de température

Des cycles de chauffage et de refroidissement de 40 à 60°C ont été exécutés sur des poutres de section rectangulaire de 40 x 75 centimètres en béton [Taheri98]. Ce cycle de températures est appliqué sur une des faces de 40 centimètres de la poutre au moyen d'une saumure. Les autres faces sont laissées à la

température du laboratoire soit à environ 25°C [Taheri98]. Le modèle TranChlor est utilisé pour reproduire les résultats de ces essais en optimisant le coefficient de conductivité thermique. La géométrie de la poutre et les conditions de bord présentent un comportement bidirectionnel dès que l'on s'éloigne du béton d'enrobage où la saumure calorifère est appliquée, comme le montrent les résultats. A plus grandes profondeurs, où l'effet bidimensionnel est plus important, le modèle TransChlor montre une surestimation des valeurs de température réellement mesurées (milieu de poutre). Dans le béton d'enrobage, le transfert thermique par simulation avec TransChlor coïncide avec les mesures en laboratoire (Figure 3.3).

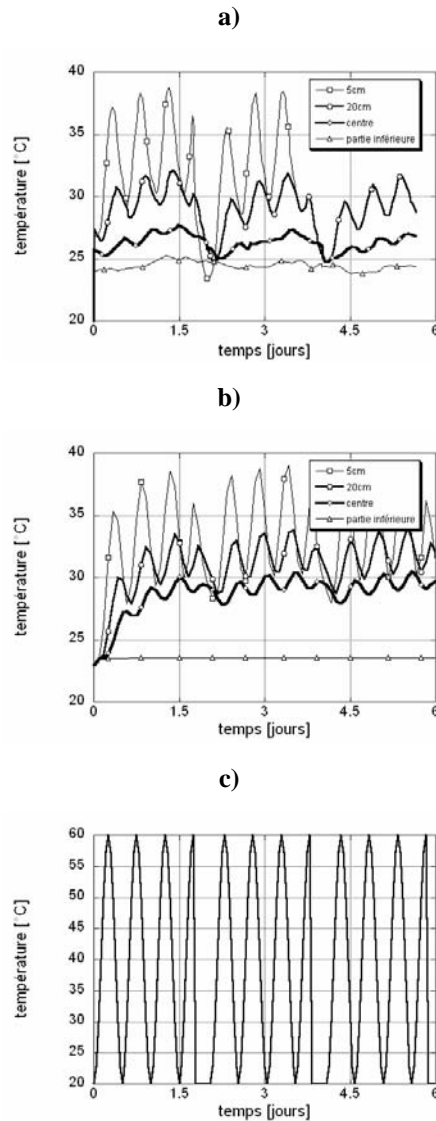


FIGURE 3.3: Simulation avec TransChlor et comparaison avec les mesures en laboratoire pour la diffusion thermique sur une poutre a) mesures en laboratoire [Taheri98], b) résultats des simulations avec TransChlor, c) condition du bord du modèle où la saumure calorifère est appliquée.

### 3.1.3 Carbonatation

Le profil du pH dans le béton d'enrobage (EQ. 3.11, Figure 3.4) utilisé dans le modèle TransChlor prend en considération : les zones de béton non carbonatées avec un pH s'élevant à 12.6 [Pettersson96], les zones dans un béton totalement carbonatées avec un pH s'élevant à 6.5 [Pettersson96] et une zone de transition entre ces deux dernières zones. Cette zone de transition est fixée par un point où le béton est considéré comme carbonaté [Parott94a] [Drochytka01], soit lorsque le pH s'élève à 10.8. Ce point représente la profondeur de carbonatation obtenue par le modèle TransChlor [Papadakis90].

$$p_H = 12.6 \cdot \left[ \frac{6.5}{12.6} + \frac{1 - 6.5/12.6}{1 + \left( \frac{1 - (x - x_c + 2.88)/4}{1 - d_c} \right)^4} \right] \quad (EQ 3.11)$$

- $p_H$  valeur du pH dans la zone de transition,
- $x$  [mm] profondeur dans le béton d'enrobage,
- $x_c$  [mm] profondeur de carbonatation dans le béton d'enrobage,
- $d_c$  [-] paramètre du modèle valant 0.5.

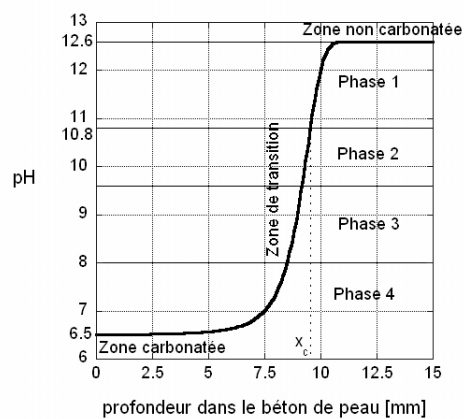


FIGURE 3.4: Profil du pH en fonction de la profondeur dans le béton d'enrobage, phases de carbonatation (§ A.5.2.2).

### 3.1.3.1 Modélisation de la profondeur de carbonatation

Le modèle mathématique proposé [Papadakis91a] prend en compte [Richardson02] [Delmi04] [Chaussadent99].

- la diffusion du gaz carbonique dans le réseau poreux du béton,
- sa dissolution dans la phase liquide interstitielle,
- la dissolution de la portlandite,
- sa diffusion sous forme ionique dans la phase aqueuse,
- sa réaction avec le gaz carbonique dissous,
- la réaction du gaz carbonique sur les silicates hydratés et les composés non hydratés les silicates de tricalcium et les silicates de dicalcium (§ A.4.1),
- la réduction du volume des pores due à la carbonatation du béton
- et de la condensation sur les parois des pores de l'eau produite lors de la carbonatation.

L'équation générale de transport du gaz carbonique tient compte : du taux de remplissage des pores par l'eau, de la dissolution du gaz carbonique dans l'eau, de la transformation de la portlandite par consommation des silicates de tricalcium et de dicalcium (EQ. 3.12) [Papadakis91].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon \cdot (1-f) \cdot [\text{CO}_2]) = \text{div}(D_B(\epsilon, H_{\text{ext}}) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}([\text{CO}_2])) - (\epsilon_{\text{ini}} \cdot f_w \cdot r_{\text{CH}} + 3 \cdot r_{\text{CSH}} + 3 \cdot r_{\text{C3S}} + 2 \cdot r_{\text{C2S}}) \quad (\text{EQ } 3.12)$$

t	[s]	temps,
[CO <sub>2</sub> ]	[mol/m <sup>3</sup> air]	concentration molaire du gaz carbonique,
D <sub>B</sub>	[mm <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion du gaz carbonique dans le béton,
H <sub>ext</sub>	[-]	humidité relative atmosphérique moyenne depuis la confection d'un béton jusqu'au temps traité,
f <sub>w</sub>	[-]	rapport du volume du film d'eau sur la paroi des pores sur le volume du pore,
ε	[-]	volume des pores sur le volume total du béton,
ε <sub>ini</sub>	[-]	porosité initiale avant les effets de l'hydratation et de la carbonatation,
r <sub>CH</sub>	[mole/s.m <sup>3</sup> béton]	taux de réaction du gaz carbonique avec la portlandite,
r <sub>CSH</sub>	[mole/s.m <sup>3</sup> béton]	taux de réaction moyen des silicates de tricalcium et dicalcium pour former des silicates de calcium hydraté,
r <sub>C3S</sub>	[mole/s.m <sup>3</sup> béton]	taux de réaction des silicates de tricalcium,
r <sub>C2S</sub>	[mole/s.m <sup>3</sup> béton]	taux de réaction des silicates de dicalcium,
f	[-]	teneur en eau, sans unité pour ces équations, rapporté à la masse volumique de l'eau.

La profondeur de carbonatation peut être obtenue sous un aspect simplifié (EQ. 3.13), sous la forme d'une constante multipliant la racine du temps, ceci à partir de l'équation générale de transport de gaz carbonique précédente (EQ. 3.12). Cependant, des méthodes numériques plus complexes existent et attendent d'être validées par des essais en laboratoire [Ishida00a] [Saetta03] [Delmi04]. Les hypothèses et les simplifications pour cette formulation simplifiée peuvent être consultées en annexe (§ E.5).

$$x_c = \frac{1}{16.75} \cdot \frac{\rho_C}{\rho_w} \cdot \frac{(E/C) - 0.3}{1 + (\rho_C/\rho_w) \cdot (E/C)} \cdot (1 - H_{\text{ext}}) \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{\rho_C}{\rho_w} \cdot \frac{E}{C} + \frac{\rho_C}{\rho_G} \cdot \frac{G}{C}\right) \cdot y_{\text{CO}_2} \cdot t} \quad (\text{EQ } 3.13)$$

C	[kg/m <sup>3</sup> de béton]	quantité de ciment,
G	[kg/m <sup>3</sup> de béton]	quantité de granulats,
E	[kg/m <sup>3</sup> de béton]	quantité d'eau de gâchage,
ρ <sub>C</sub>	[kg/m <sup>3</sup> ]	masse volumique du ciment,
ρ <sub>G</sub>	[kg/m <sup>3</sup> ]	masse volumique des granulats,
ρ <sub>w</sub>	[kg/m <sup>3</sup> ]	masse volumique de l'eau,
y <sub>CO2</sub>	[-]	concentration volumique de gaz carbonique dans l'air.

### 3.1.3.2 Validation du modèle

Les profondeurs de carbonatation sont mesurées après 5 jours sur des éprouvettes confectionnées avec une recette de béton ayant des rapports massiques de l'eau sur le ciment et de granulat sur ciment de respectivement 0.65 et 5. Les essais de carbonatation sont accélérés par le biais d'un air ambiant contaminé à 50% de gaz carbonique durant les essais (§ A.1.5). La température d'essai fut celle du laboratoire qui s'élève à 25°C [Papadakis90].

Les prédictions obtenues avec le modèle selon différentes humidités relatives montrent une vitesse de carbonatation importante pour les bétons entreposés à une humidité relative de l'air d'environ 50%.

Les résultats expérimentaux suivent également cette tendance (Figure 3.5 a). Le modèle de carbonatation implémenté dans TransChlor montre une bonne représentativité des essais effectués en laboratoire [Papadakis90].

Ces résultats mettent en évidence l'influence importante des conditions d'entreposage à l'humidité relative de l'air et de manière indirecte de la teneur en eau dans le béton (§ A.5.2.1).

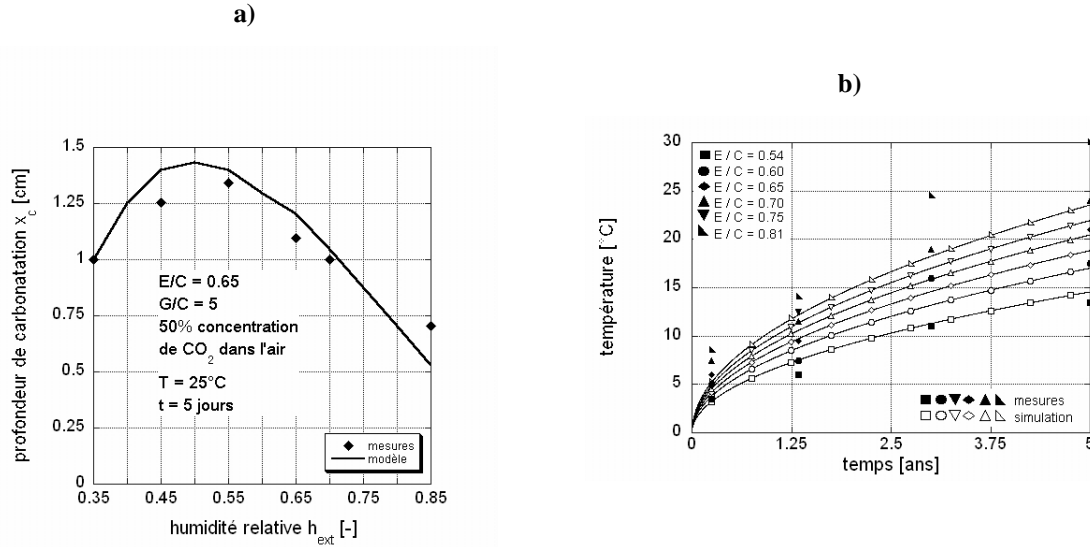


FIGURE 3.5: a) Effet de l'humidité relative sur la profondeur de carbonatation et comparaison avec le modèle de prédiction [Papadakis90], b) Comparaison du modèle TransChlor avec les mesures en laboratoire [Vénuat69] de l'évolution dans le temps de la profondeur de carbonatation pour différentes recettes de béton.

L'influence des recettes de béton est démontrée par une série d'essais de carbonatation sur des éprouvettes confectionnées avec une quantité massique de ciment de  $350 [kg/m^3]$  rapportée au béton [Vénuat69]. Ces essais de carbonatation sont également accélérés, puisque la concentration de gaz carbonique dans l'air vaut 20% à pression atmosphérique. La vitesse de carbonatation du béton augmente avec le rapport massique de l'eau sur le ciment de la recette de béton. Lorsque le rapport massique de l'eau sur le ciment est faible, la représentativité avec le modèle TransChlor montre une bonne correspondance. Avec un rapport massique plus élevé, la variabilité est plus importante (Figure 3.5 b). Une variabilité identique a déjà été mise en évidence lors des essais de perméabilité à l'air Torrent développés dans le cadre de ce travail, qui démontrent une variabilité plus importante pour un rapport massique de l'eau sur le ciment plus élevé (§ 3.2.3.1) [Conciatori05] [Denarie05].

### 3.1.4 Transport hydrique de la vapeur d'eau

Les deux modes de transport de vapeur d'eau et de succion capillaire de l'eau liquide sont séparés dans le modèle TransChlor [Janz97] [Baroghel94] [Roelfstra00] [Roelfstra01] [Samson04].

Le modèle TransChlor utilise la loi de Fick pour le transport de vapeur d'eau (§ A.5.5.2) [Bazant71] [Oberbeck95] [Bazant86]. Cette loi permet de simuler un processus de diffusion par un flux dû à un gradient de concentration de vapeur d'eau (EQ. 3.14).

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \text{div}(D_h(T, H) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(H)) \quad (EQ. 3.14)$$

$H$  [-] humidité relative dans les pores du béton,

$t$  [s] temps,

$D_h$  [ $mm^2/s$ ] coefficient de diffusion de la vapeur d'eau,



T [°C] température.

Le coefficient de diffusion (EQ. 3.15) fait intervenir la température par la loi d'Arrhenius [Saetta95], et l'humidité relative présente dans les pores du béton (Figure A.33) [Bazant71].

$$D_h(T, H) = D_{T_0} \cdot \left[ \alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + \left( \frac{1 - H}{1 - H_c} \right)^n} \right] \cdot e^{\frac{Q}{R} \cdot \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)} \quad (EQ. 3.15)$$

$D_{T_0}$  [mm<sup>2</sup>/s] coefficient de diffusion en régime permanent et à température constante,

$\alpha_0$ ,  $H_c$  et  $n$  coefficients du modèle de Bazant,

$Q$  [mol/J] énergie d'activation du modèle d'Arrhenius,

$R$  [J/mol.°C] constante des gaz (8.314510),

$T_0$  [°C] température de base du béton lors de la détermination de  $Q$  et de  $D_{T_0}$ ,

$T$  [°C] température du béton.

Le coefficient de diffusion en régime permanent et à température constante (Tableau 3.2) a été établi d'après des essais effectués sur des bétons équivalents obtenus dans la littérature [Delagrave96] [Dhir93] [Halamickova95] et ceux employés dans les différents modèles de transport [Roelfstra01] [Janz97] [Johanesson98] [Lunk98] [Oberbeck95]. Les essais en laboratoire ont fourni des valeurs de coefficients de diffusion de vapeur d'eau étranges, à cause d'une microfissuration sur des éprouvettes témoins (§ 3.2.3.3).

Type de perméabilité du béton	Coefficient de diffusion $D_{T_0}$ [10 <sup>-6</sup> mm <sup>2</sup> /s]
A	60
B	130
C	200

TABLEAU 3.2: Coefficient de diffusion de la vapeur d'eau [Roelfstra00].

### 3.1.4.1 Modélisation de la courbe d'adsorption

Le modèle BET utilise les données provenant d'essais effectués sur la pâte de ciment durcie. Le modèle pris en compte dans TransChlor transforme le modèle BET en l'adaptant pour le cas des bétons (EQ. 3.16) [Xi94].

$$w_c(H) = \frac{C_{BET} \cdot k \cdot V_m \cdot H}{[1 - (k \cdot H)] \cdot [1 + (C_{BET} - 1) \cdot k \cdot H]} \quad (EQ. 3.16)$$

$H$  [-] humidité relative dans les pores du béton,

$C_{BET}$  paramètre d'adsorption de la vapeur d'eau du modèle BET,

$k$  paramètre du modèle BET,

$V_m$  capacité de stockage de la monocouche,

$w_c$  [g/g] teneur en eau dans la pâte de ciment.

Le paramètre  $C_{BET}$  prend en considération l'adsorption totale de la vapeur d'eau, l'adsorption latente de vapeur d'eau et la température (EQ. 3.17) [Xi94].

$$C_{BET} = e^{\frac{E_I - E_L}{R \cdot T}} \quad (EQ. 3.17)$$

- $E_I$  [J/mol] adsorption totale de la vapeur d'eau,  
 $E_L$  [J/mol] adsorption latente de la vapeur d'eau,  
 $R$  [J/mol.°C] constante des gaz, valant 8.314510,  
 $T$  [°C] température.

En définissant une variable de substitution  $C_0$  (EQ. 3.18), l'équation précédente (EQ. 3.17) peut être simplifiée (EQ. 3.19). Cette variable de substitution est déterminée par des essais expérimentaux. Sa valeur vaut 855 (EQ. 3.19) avec un coefficient de variation de 0.098 [Xi94] pour les bétons usuels.

$$C_0 = \frac{E_I - E_L}{R} \quad (EQ. 3.18)$$

$$C_{BET} = e^{\frac{C_0}{T}} = e^{\frac{855}{T}} \quad (EQ. 3.19)$$

- $C_0$  [°C] variable de substitution, valant 855.

La capacité de la monocouche est définie par la masse adsorbée requise par le béton d'enrobage pour former une simple couche de molécules de vapeur d'eau (EQ. 3.20 et Figure 3.7 a) [Xi94].

$$V_m = V_t(t) \cdot V_{EC}\left(\frac{E}{C}\right) \cdot V_{Ct}(C_t) \cdot V_T(T) \quad (EQ. 3.20)$$

- $V_t(t)$  paramètre prenant en considération l'effet du temps de cure du béton,  
 $V_{EC}(E/C)$  paramètre prenant en considération la composition du béton,  
 $V_{Ct}(C_t)$  paramètre prenant en considération le type de ciment,  
 $V_T(T)$  paramètre prenant en considération l'effet de la température. L'effet de la température est négligeable devant la prise en compte dans le paramètre  $C_{BET}$ , ce paramètre vaut donc un.

L'effet du temps de cure est formulé par une relation empirique provenant de résultats d'essai (Figure 3.6 a) [Xi94]. Lorsque le temps de cure est inférieur ou égal à 5 jours, sa valeur peut être considérée comme constante (EQ. 3.21), sinon elle prend la forme ci-après (EQ. 3.22).

$$V_t(t) = 0.068 - \frac{0.22}{t} \quad \text{si } t > 5 \quad (EQ. 3.21)$$

$$V_t(t) = 0.068 - \frac{0.22}{5} = 0.024 \quad \text{si } t \leq 5 \quad (EQ. 3.22)$$

- $t$  [jours] période de cure du béton.

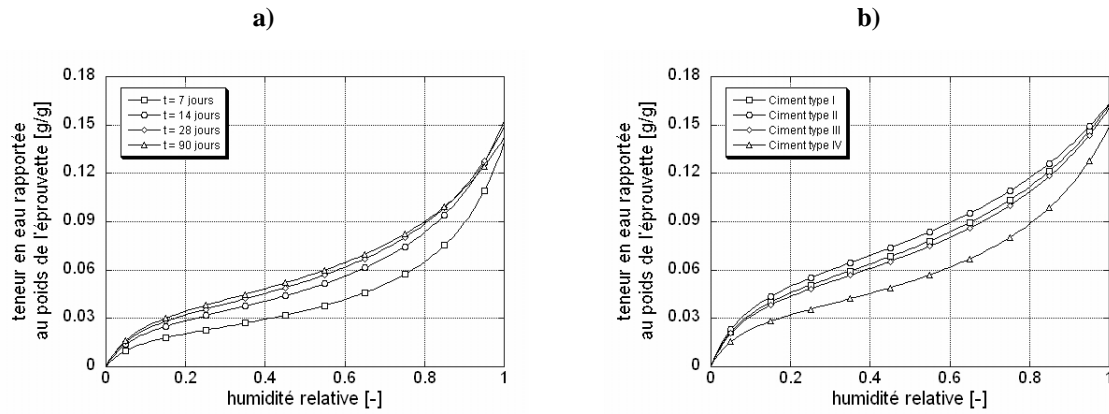


FIGURE 3.6: Isothermes d'adsorption [Xi94], a) influence du temps de cure, b) influence du type de ciment.

L'effet de la composition de béton est prise en considération par le rapport massique de l'eau sur le ciment (EQ. 3.23 et Figure 3.7) [Xi94].

$$V_{EC} \left( \frac{E}{C} \right) = 0.85 + 0.45 \cdot \left( \frac{E}{C} \right) \quad (EQ. 3.23)$$

$E/C$  [-] rapport massique de l'eau sur le ciment.

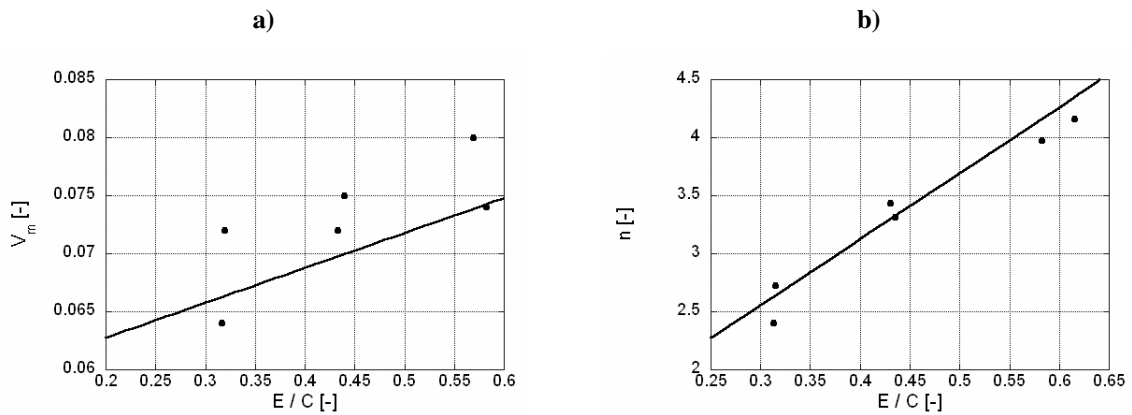


FIGURE 3.7: Influence de la composition du béton sur les paramètres de la loi de Bazant [Xi94].

Le type de ciment est pris en considération par des valeurs constantes (Tableau 3.3 et Figure 3.6 b) [Xi94].

Type de ciment	Utilisation	$V_{Ct}$
Type I ciment portland	usage général	0.9
Type II ciment portland composé	chaleur d'hydratation et résistance au sulfate modérées	1
Type III ciment de haut fourneau	résistance initiale élevée	0.85
Type IV ciment pouzzolanique	faible chaleur d'hydratation	0.6

TABLEAU 3.3: Valeurs du paramètre  $V_{Ct}$  en fonction du type de ciment [Xi94].

Le paramètre  $k$  tient compte du fait qu'il peut y avoir plusieurs couches de molécules. En premier lieu, l'équation ci-après (EQ. 3.24) détermine le nombre de couches  $n$  à l'état de saturation (Figure 3.7 b).

$$n = N_t(t) \cdot N_{EC}\left(\frac{E}{C}\right) \cdot N_{Ct}(C_t) \cdot N_T(T) \quad (EQ. 3.24)$$

$n$  nombre de couches à l'état de saturation,

$N_t(t)$  paramètre prenant en considération l'effet du temps de cure du béton,

$N_{EC}(E/C)$  paramètre prenant en considération la composition du béton,

$N_{Ct}(C_t)$  paramètre prenant en considération le type de ciment,

$N_T(T)$  paramètre prenant en considération l'effet de la température valant un, car l'effet de la température est négligeable devant la prise en compte dans le paramètre  $C_{BET}$ .

L'effet du temps de cure est formulé par une relation empirique [Xi94]. Lorsque le temps de cure est inférieur ou égal à 5 jours, sa valeur peut être considérée comme constante (EQ. 3.25), sinon elle prend la forme ci-après (EQ. 3.26).

$$N_t(t) = 2.5 - \frac{15}{t} \quad \text{si } t > 5 \quad (EQ. 3.25)$$

$$N_t(t) = 2.5 - \frac{15}{5} = 5.5 \quad \text{si } t \leq 5 \quad (EQ. 3.26)$$

L'effet de la composition de béton est pris en considération par le rapport massique de l'eau sur le ciment (EQ. 3.27) [Xi94].

$$N_{EC}\left(\frac{E}{C}\right) = 0.33 + 2.2 \cdot \left(\frac{E}{C}\right) \quad (EQ. 3.27)$$

Le type de ciment est pris en considération par des valeurs constantes (Tableau 3.4) [Xi94].

Type de ciment	Utilisation	$N_{Ct}$
Type I ciment portland	usage général	1.1
Type II ciment portland composé	chaleur d'hydratation et résistance au sulfate modérées	1
Type III ciment de haut fourneau	résistance initiale élevée	1.15
Type IV ciment pouzzolanique	faible chaleur d'hydratation	1.5

TABLEAU 3.4: Valeurs du paramètre  $N_{Ct}$  en fonction du type de ciment [Xi94].

Finalement, le paramètre  $k$  est déterminé par l'équation ci-après (EQ. 3.28) [Xi94].

$$k = \frac{\left(1 - \frac{1}{n}\right) \cdot C_{BET} - 1}{C_{BET} - 1} \quad (EQ. 3.28)$$

La validation de ce modèle a été exécutée [Xi94] sur de nombreux essais (Figure 3.8).

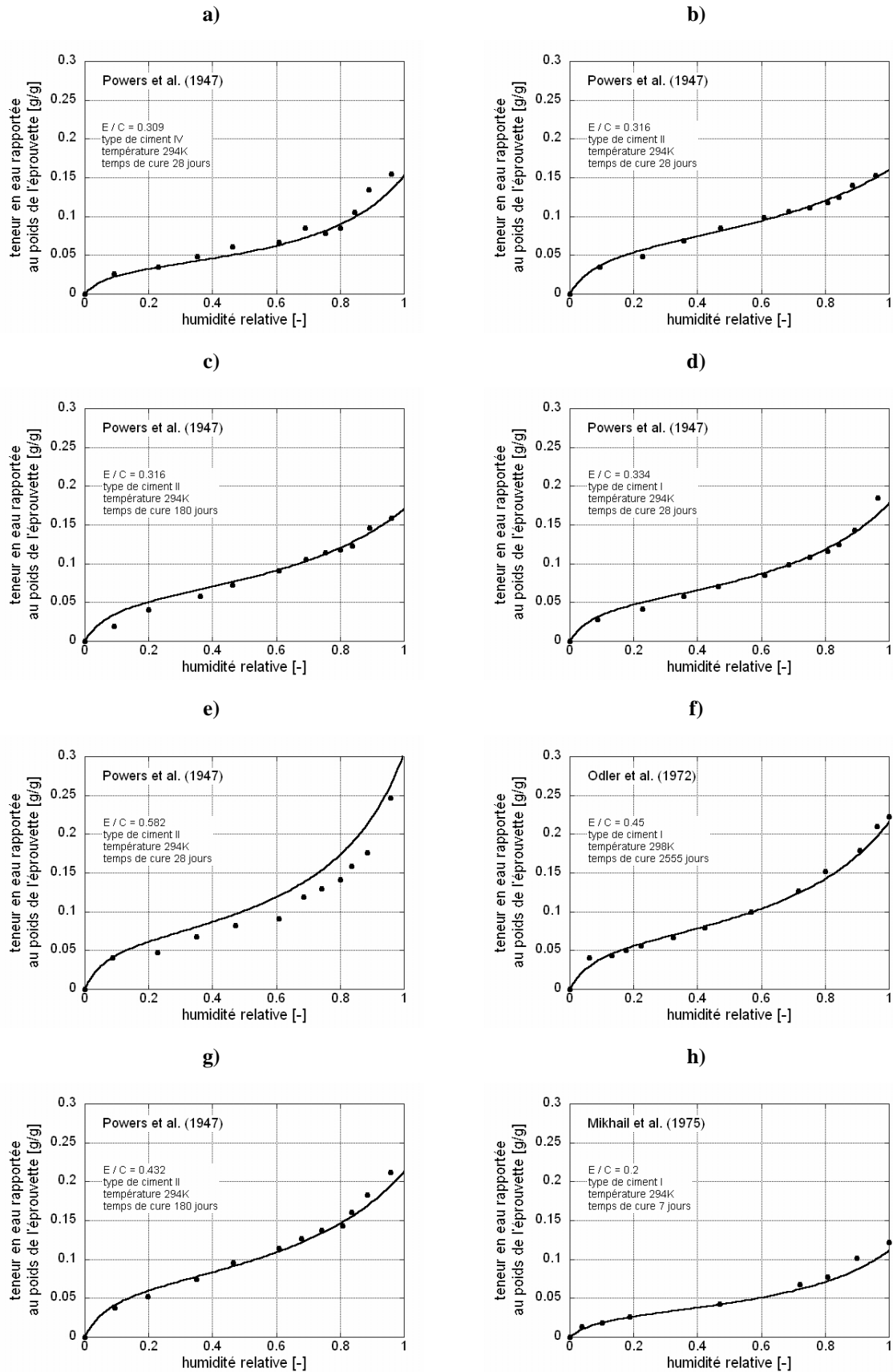


FIGURE 3.8: Comparaison du modèle de Bazant avec les mesures effectuées sur plusieurs recettes de mortier [Xi94].

La teneur en eau de la pâte de ciment est rapportée au béton en tenant compte de la quantité d'eau et de ciment présente dans la composition du béton (EQ. 3.29). Une correction permet de prendre en considération la teneur en eau à saturation du béton (EQ. A.10).

$$w = \frac{w_c(H) \cdot (C + C \cdot E/C)}{w_c(1)} \cdot w_{sat} \quad (EQ. 3.29)$$

$w_{sat}$  [kg/m<sup>3</sup>] teneur en eau, à l'état saturé, rapportée au volume du béton.

L'effet de la température reste modeste pour les isothermes d'adsorption. Le rapport massique de l'eau sur le ciment représente la principale variabilité dans ce modèle (Figure 3.9).

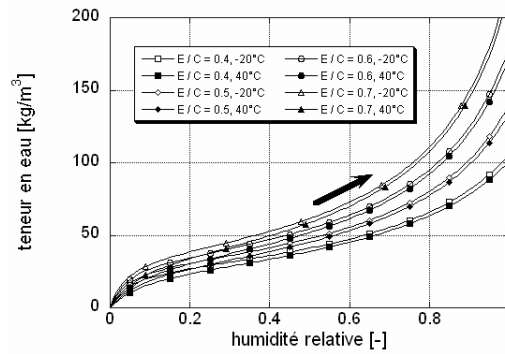


FIGURE 3.9: Evolution de l'isotherme d'adsorption d'après le modèle de Bazant pour plusieurs recettes de béton à deux températures différentes.

### 3.1.4.2 Modélisation de la courbe de désorption

Le modèle de désorption [Roelfstra89] provient de données de résultats expérimentaux [Hundt78]. Les essais ont été effectués sur des éprouvettes de différents rapports massiques de l'eau sur le ciment, soit 0.4, 0.45, 0.5 et 0.55, et à différentes températures, soit 20°C, 45°C, 57°C et 70°C (EQ. 3.30, EQ. 3.31, EQ. 3.32 et EQ. 3.33) [Roelfstra89].

$$\frac{w_r(H)}{C} = \frac{1}{(1-h_t)^2} \cdot \begin{bmatrix} h_t^2 & 1-(2 \cdot h_t) & h_t^2-h_t \\ -(2 \cdot h_t) & 2 \cdot h_t & 1-h_t^2 \\ 1 & -1 & h_t-1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E/C - (c_4 \cdot \alpha) \\ (c_1 + c_2 \cdot h_t + c_3 \cdot h_t^2) \cdot \alpha \\ (c_2 + 2 \cdot c_3 \cdot h_t) \cdot \alpha \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ h \\ h^2 \end{bmatrix} \quad \text{si } h_t \leq h < 1 \quad (EQ. 3.30)$$

$$\frac{w_r(H)}{C} = (c_1 + c_2 \cdot h + c_3 \cdot h^2) \cdot \alpha \quad \text{si } 0.35 \leq h < h_t \quad (EQ. 3.31)$$

$$\frac{w_r(H)}{C} = [(- (400 \cdot c_1 / 49) + c_3) \cdot h + 40 \cdot c_1 / 7 + c_2] \cdot \alpha \cdot h \quad \text{si } h < 0.35 \quad (EQ. 3.32)$$

$$h_t = 1 - 0.161 \cdot \alpha \quad (EQ. 3.33)$$

$\alpha$  [-] degré d'hydratation du béton,

$c_1$ ,  $c_2$  et  $c_3$  paramètres du matériau selon le modèle de désorption utilisé dans le modèle de Roelfstra,

- $E/C$  rapport massique de l'eau sur le ciment,  
 $C$  [kg/m<sup>3</sup> de béton] quantité massique de ciment,  
 $h_t$  humidité relative limite, valeur limite de l'humidité relative à laquelle le modèle passe d'un polynôme du second degré à un autre polynôme.

Les paramètres de matériau  $c_1$ ,  $c_2$  et  $c_3$  assurent une continuité de la courbe de désorption au point d'humidité relative limite. Les valeurs de ces paramètres sont explicitées ci-après (EQ. 3.34, EQ. 3.35 et EQ. 3.36) [Roelfstra89].

$$c_1 = 0.125 \quad (EQ. 3.34)$$

$$c_2 = 0.173 - \left(0.431 \cdot \frac{T - 20}{25}\right) \quad (EQ. 3.35)$$

$$c_3 = 0.060 + 0.392 \cdot \frac{T - 20}{25} \quad (EQ. 3.36)$$

$T$  [°C] température.

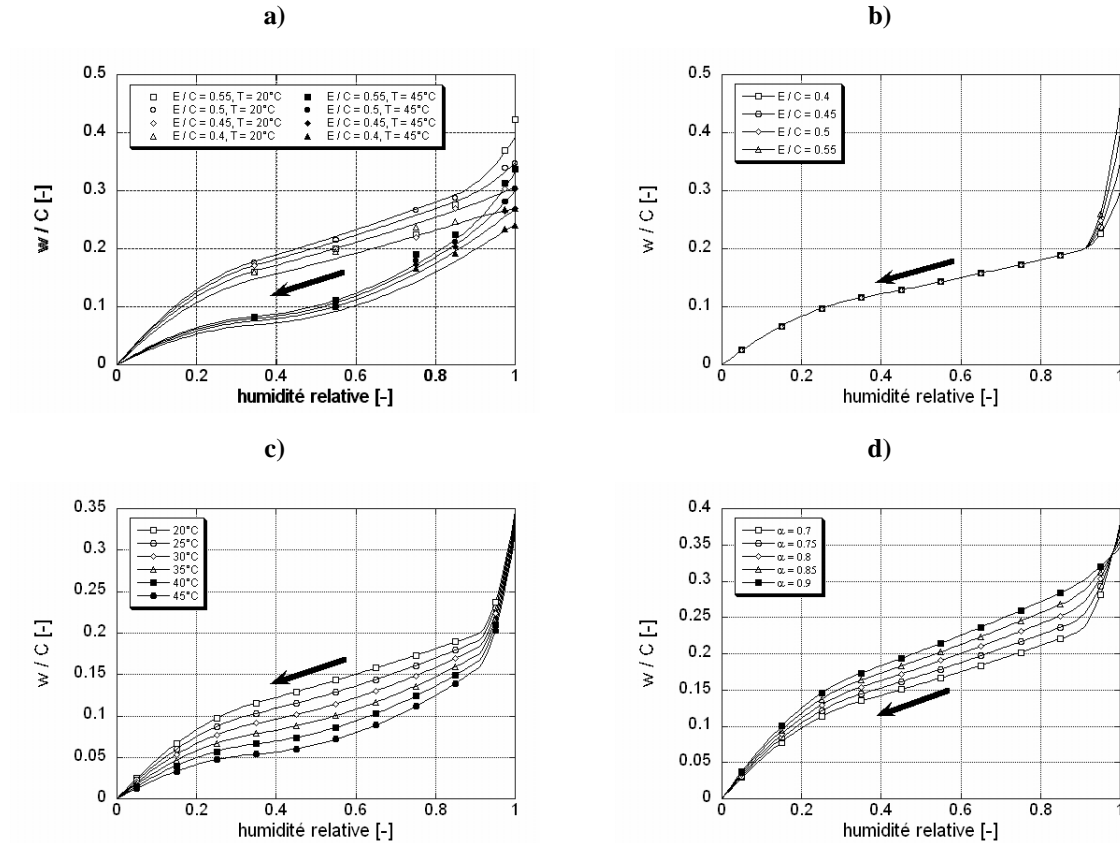


FIGURE 3.10: Comportement du modèle de l'isotherme d'adsorption à travers plusieurs paramètres,  $C$  = quantité de ciment rapportée au volume de béton [Roelfstra89], a) Comparaison du modèle avec les essais, b) Variation de la composition du béton,  $\alpha = 0.6$ ,  $T = 20^\circ\text{C}$  c) Variation de la température,  $\alpha = 0.6$ ,  $E/C = 0.45$ , d) Variation du degré d'hydratation,  $T = 20^\circ\text{C}$ ,  $E/C = 0.5$ .

La comparaison entre les données provenant des essais expérimentaux et le modèle montre une très bonne corrélation (Figure 3.10). L'influence du rapport massique de l'eau sur le ciment, de la température et du degré d'hydratation peut être visualisée à travers plusieurs figures (Figure 3.10).

Une correction permet de prendre en considération la teneur en eau à saturation du béton (EQ. A.10) dans l'équation ci-après (EQ. 3.37).

$$w = \frac{w_r(H)}{w_r(1)} \cdot w_{\text{sat}} \quad (\text{EQ. 3.37})$$

$w_{\text{sat}}$  [kg/m<sup>3</sup>] teneur en eau, à l'état saturé, rapportée au volume du béton.

Le rapport massique de l'eau sur le ciment et la température montrent une grande variabilité dans ce modèle (Figure 3.11).

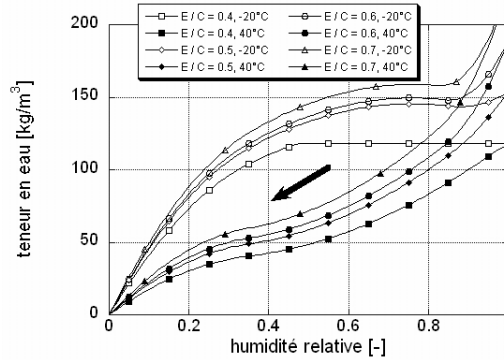


FIGURE 3.11: Comportement du modèle de l'isotherme de désorption en fonction de la composition du béton et de la température.

### 3.1.4.3 Isotherme d'adsorption et de désorption

Lors des simulations avec TransChlor, des changements brutaux de la teneur en eau dans le béton peuvent apparaître entre deux intervalles de temps. Ces cas apparaissent fréquemment lors de grandes variations de température et lorsque l'on passe d'une courbe de désorption à la courbe d'adsorption. Les variations les plus importantes de ce problème numérique se situent dans le béton d'enrobage proche de l'interface air-béton. Ainsi une transition plus douce est modélisée lorsque le premier tiers des noeuds montre un écart supérieur à 5 [kg/m<sup>3</sup>] sur un intervalle de temps d'une heure. Dans ce cas, l'équation ci-après (EQ. 3.38) est appliquée sur toute la section étudiée et permet d'avoir une évolution temporelle de la teneur avec une transition plus douce. Cet écart a été choisi en évaluant les variations maximales en utilisant un modèle d'adsorption et de désorption identiques à l'état isotherme.

$$w_{t, \text{final}} = w_{t-1} + \frac{w_t - w_{t-1}}{(\Delta t)/36} \quad \text{si} \quad |w_t - w_{t-1}| > 5 \quad (\text{EQ. 3.38})$$

$w_{t, \text{final}}$  [kg/m<sup>3</sup>] teneur en eau rapportée au volume du béton de transition,

$w_{t-1}$  [kg/m<sup>3</sup>] teneur en eau rapportée au volume du béton, résultat de la simulation au temps t-1,

$w_t$  [kg/m<sup>3</sup>] teneur en eau rapportée au volume du béton, résultat de la simulation au temps t,

$\Delta t$  [s] intervalle de temps utilisé dans TransChlor.



### 3.1.5 Transport hydrique de l'eau liquide par capillarité

La modélisation de la succion capillaire de l'eau liquide représente une originalité de ce travail. Bien que la loi de Fick représente très bien l'effet de la diffusion de la vapeur d'eau, elle ne représente pas la succion capillaire sous la forme rencontrée lors de mesures en laboratoire (§ A.5.5.3 et Figure 3.1). Une bonne représentativité de la succion capillaire est obtenue par les équations de la cinétique (EQ. 3.39).

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\left(D_{\text{cap}}\left(t, H, \frac{E}{C}, T\right) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(H)\right) \quad (\text{EQ. 3.39})$$

- $H$  [-] humidité relative dans les pores du béton,  
 $t$  [s] temps depuis le contact de l'eau liquide à la surface du béton,  
 $D_{\text{cap}}$  [mm/s] coefficient de capillarité,  
 $E/C$  [-] rapport massique de l'eau sur le ciment,  
 $T$  [°C] température.

Le coefficient de capillarité provient directement des résultats des essais expérimentaux développés au cours de ce travail de recherche (§ 3.2.3.4). Ce coefficient de capillarité (Figure 3.12) peut être également déterminé à partir des essais de perméabilité à l'air de Torrent et des essais Wenner (§ 3.2.3.1) ou encore en connaissant la composition du béton.

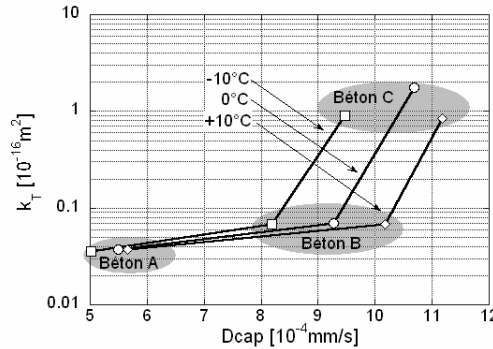


FIGURE 3.12: Influence de la perméabilité à l'air d'un béton à 20°C sur le coefficient de capillarité.

Le coefficient de capillarité dépend du niveau de température. Les paramètres  $a_1$ ,  $a_2$  et  $a_3$  peuvent être déterminés par l'équation ci-après (EQ. 3.40).

$$\begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.788 \cdot 10^{-7} & -(7.355 \cdot 10^{-6}) & -(2.781 \cdot 10^{-4}) & -(1.231 \cdot 10^{-2}) \\ -(3.040 \cdot 10^{-7}) & 7.975 \cdot 10^{-6} & 3.368 \cdot 10^{-4} & 1.779 \cdot 10^{-2} \\ 8.002 \cdot 10^{-8} & -(2.262 \cdot 10^{-6}) & -(8.978 \cdot 10^{-5}) & -(4.608 \cdot 10^{-3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} T^3 \\ T^2 \\ T \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (\text{EQ. 3.40})$$

$a_1$ ,  $a_2$  et  $a_3$  [-] paramètres pour l'obtention du coefficient de capillarité.

La composition du béton et l'humidité relative dans les pores du béton sont prises en considération par l'équation suivante (EQ. 3.41).

$$D_{\text{cap,to}} = \left\{ \begin{array}{cc} 100 \cdot H & 1 \end{array} \right\} \cdot \left[ \begin{array}{ccc} 6,248 \cdot 10^{-5} & -(1,038 \cdot 10^{-4}) & 3,003 \cdot 10^{-5} \\ a_1 & a_2 & a_3 \end{array} \right] \cdot \left\{ \begin{array}{c} (E/C)^2 \\ E/C \\ 1 \end{array} \right\} \quad (\text{EQ 3.41})$$

$D_{\text{cap,to}}$  [mm/s] coefficient de capillarité au début du contact avec l'eau liquide.

La valeur de  $D_{\text{cap,to}}$  vaut  $1,291 \times 10^{-4}$  [mm/s] pour les bétons avec imprégnation hydrophobe.

Dès que la succion capillaire s'initie, le coefficient de capillarité diminue en fonction du temps (EQ. 3.42). Cette diminution peut être représentée par une perte de charge hydraulique plus importante en fonction de la pénétration plus en profondeur du front de l'eau (Figure 3.13).

$$D_{\text{cap}} = D_{\text{cap,to}} \cdot \left[ \alpha_c + \frac{1 - \alpha_c}{1 + \left( \frac{1 - t/10}{1 - t_c} \right)^4} \right] \quad (\text{EQ 3.42})$$

$\alpha_c$  et  $t_c$  coefficients du modèle de capillarité, valant après calibration avec les essais respectivement 0.09 et 0.97.

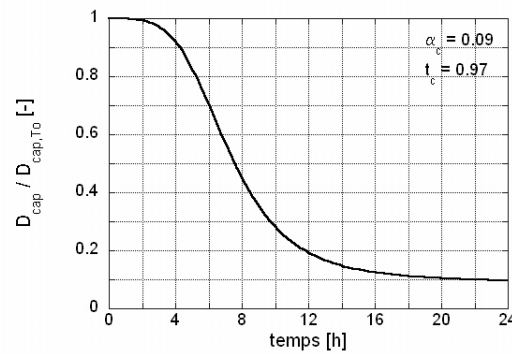


FIGURE 3.13: Atténuation du coefficient de capillarité en fonction du temps.

Dans le modèle TransChlor, le coefficient de capillarité est déterminé en fonction de la température et de l'humidité relative moyenne dans le béton d'enrobage représenté par les 40 premiers millimètres (§ 3.2.3.4). L'utilisation du modèle TransChlor avec deux conditions de bord introduit le coefficient de capillarité selon l'esquisse ci-après (Figure 3.14).

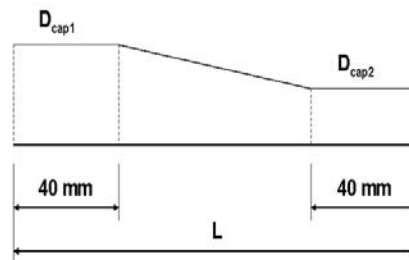


FIGURE 3.14: Evolution spatiale du coefficient de capillarité dans le cas de deux conditions de bord activées.

### 3.1.5.1 Validation du modèle de capillarité

Ce travail de validation a été entrepris grâce à une collaboration étroite avec un projet de recherche dans le développement d'un capteur à fibre optique au laboratoire d'informatique et de mécanique appliquées à la construction sous la direction du professeur Ian Smith [Laferriere05]. Établi sur la base d'un béton de perméabilité B (§ 3.2.1), un essai de capillarité fut effectué sur un échantillon de béton équipé d'un capteur à fibre optique. Le capteur d'ions chlore, utilisé dans l'essai de mesures en continu, est un détecteur chimique à fibres optiques basé sur le principe d'atténuation de l'intensité de la fluorescence d'un indicateur colorant sensible aux ions chlore. Par le biais d'une analyse de la spectroscopie de fluorescence, méthode souvent mise en oeuvre dans les domaines de la biochimie et de la médecine, les variations de concentration en ions chlorures libres peuvent être déterminées. Ce capteur de petite taille, facile à englober à différentes profondeurs dans la couche d'enrobage du béton ne subit pas l'influence des champs magnétiques et permet la détection de faibles quantités d'ions chlorures libres dans l'eau interstitielle du béton. De plus, il offre l'avantage de mesures quantitatives et non-destructives [Laferriere05].

La cure de cette éprouvette s'est prolongée sur 31 jours, puis immergée dans une saumure de 3% de chlorure de sodium selon les procédures d'essais standards (Figure 3.18). La migration initiale est plus rapide en réalité que la simulation, probablement due à une vibration moins intense proche du capteur, lié à un risque de rupture du capteur. Certainement pour les mêmes raisons, le moment du passage du front d'ions chlorures sur le capteur présente un retard de plusieurs heures dans la simulation avec TransChlor. A plus long terme, les résultats de mesures du capteur et de la simulation se chevauchent [Laferriere05] (Figure 3.18). Le front d'eau est mis en évidence par l'entraînement des ions chlorures par l'eau, le modèle TransChlor simule très bien cet effet.

Une comparaison avec les résultats d'essais [Lunk98] est entreprise en variant les paramètres  $\alpha_c$  et  $t_c$ . Aussi, deux types de résultat sont à disposition, soit la prise d'eau totale par plusieurs éprouvettes confectionnées de différentes recettes de béton (Figure 3.15 a), soit par des profils spatiaux de teneur en eau pour une recette de béton avec un rapport massique de l'eau sur le ciment de 0.5 à 6, 72 et 240 heures (Figure 3.15 b). Les paramètres  $\alpha_c$  et  $t_c$  valent pour le premier cas (Figure 3.15 a) 0.09 respectivement 0.95 et pour le deuxième cas (Figure 3.15 b) 0.05 respectivement 0.97. Le conditionnement préalable à ces essais de capillarité des éprouvettes s'est effectué par l'entreposage pendant au moins deux semaines des éprouvettes à une humidité relative de l'air de 60% et à une température de 20°C. Un niveau hydrique stable, obtenu par le séchage, est atteint rapidement après deux semaines car la dimension des éprouvettes sont petites, soit une épaisseur de un centimètre.

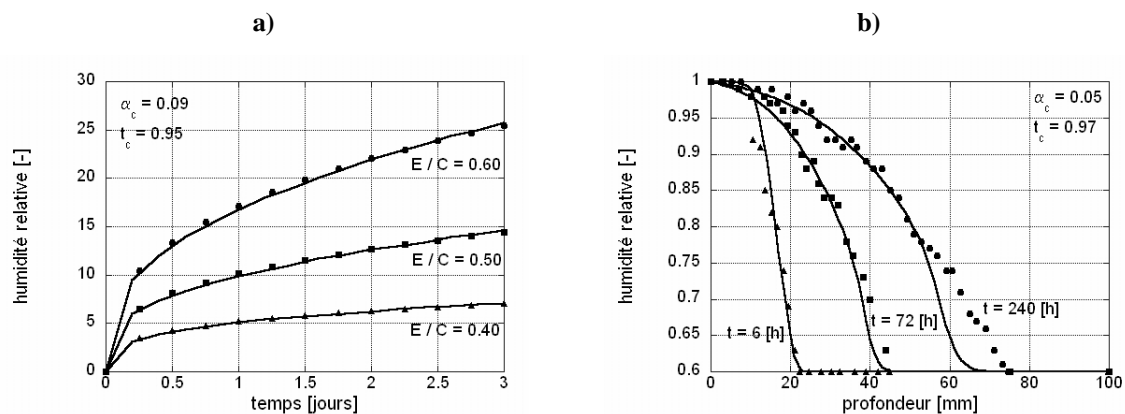


FIGURE 3.15: Comparaison des essais de capillarité [Lunk98] avec le modèle TransChlor, a) Evolution temporelle prise d'eau totale dans les éprouvettes en fonction de la perméabilité du béton, b) Profil d'eau dans le béton en fonction du temps.

### 3.1.5.2 Exemple de simulation numérique

Un cycle de mouillage et séchage permet de mettre en évidence le comportement du modèle hydrique. Les simulations se basent sur un essai de laboratoire déjà pris en référence, mais sans résultats

d'essai dans ce cas (§ 3.1.2.2) [Taheri98]. Un mouillage est entrepris tous les deux jours (Figure 3.16). L'évolution spatiale de la teneur en eau met en évidence une zone sensible du béton d'enrobage, soit jusqu'à 30 millimètres dans ce cas, où la teneur en eau subit de grandes variations. Cette zone est souvent appelée profondeur de respiration. A une profondeur plus importante, ces atténuations disparaissent et une augmentation progressive et constante en fonction de la profondeur peut être visualisée (Figure 3.16).

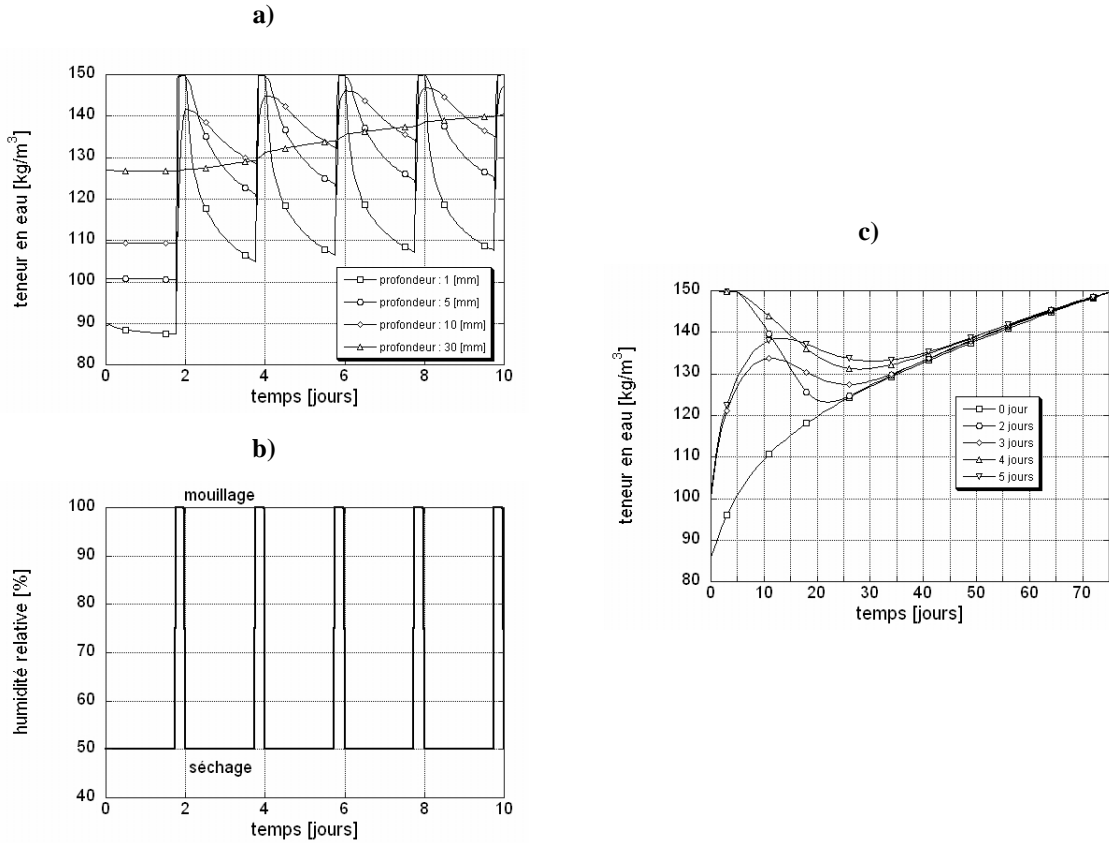


FIGURE 3.16: Comportement du modèle TransChlor lors d'un cycle de mouillage et de séchage, d'après les essais [Taheri98] a) Evolution temporelle de la teneur en eau pour plusieurs profondeurs dans le béton d'enrobage, b) Condition de bord, lorsque l'humidité est de 100%, la poutre est en contact avec l'eau liquide, c) Evolution temporelle de la teneur en eau.

### 3.1.6 Ions chlorures dans les pores du béton

La formulation générale de transport des ions chlorures dans le béton d'enrobage prend en considération les mouvements des ions chlorures par diffusion dans l'eau (§ A.5.7.1) et par entraînement avec l'eau (§ A.5.7.2 et EQ. 3.43).

$$\frac{\partial}{\partial t} C(B, T) = \text{div}(R_{Cl} \cdot c_f(B) \cdot D_h(T) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(H) + D_{Cl,t} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(C(B, T))) - (R_{Cl} \cdot c_f(B) \cdot D_{cap} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(H)) \quad (EQ 3.43)$$

t [s] temps,

B prise en compte de la carbonatation,

T [°C] température,

$R_{Cl}$  coefficient de retard,

C [kg/m³] concentration en ions chlorures totaux rapportée au volume du béton,

H	[-] humidité relative dans les pores du béton,
$D_h$	[mm <sup>2</sup> /s] coefficient de diffusion de la vapeur d'eau,
$D_{Cl,t}$	[mm <sup>2</sup> /s] coefficient de diffusion des ions chlorures totaux,
$c_f$	[kg/m <sup>3</sup> ] concentration en ions chlorures libres dans les interstices du béton rapportée au volume de la solution,
$D_{cap}$	[mm/s] coefficient de capillarité.

Ainsi, l'eau entraîne directement les ions chlorures libres. Par contre, l'équation générale mélange les ions chlorures totaux et les ions chlorures libres, ce qui produit deux inconnues différentes dans la résolution de cette équation. En considérant que les ions chlorures totaux sont la somme des ions chlorures libres et liées à la pâte de ciment, l'isotherme de Freundlich (§ A.5.7.3) peut alors être inséré dans l'équation selon la formulation suivante (EQ. 3.44).

$$C(B, T) = C_F + C_B = c_f \cdot w + c_f^\beta \cdot \gamma \quad (EQ. 3.44)$$

$C_F$	[kg/m <sup>3</sup> ] concentration en ions chlorures libres dans les interstices du béton rapportée au volume du béton,
$C_B$	[kg/m <sup>3</sup> ] concentration en ions chlorures capturés par la pâte de ciment rapportée au volume du béton.
w	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ] teneur en eau rapportée au volume du béton,
$\beta$	exposant de l'isotherme de Freundlich (0.379),
$\gamma$	facteur de l'isotherme de Freundlich reliant la concentration d'ions chlorures liées au ions chlorures libres.

La formulation générale peut alors être écrite en introduisant les ions chlorures libres et les ions chlorures liés à la pâte de ciment (EQ. 3.45).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} C(B, T) = & \text{div}(R_{Cl} \cdot c_f(B) \cdot D_h(T) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(H) + D_{Cl} \cdot w \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(c_f(B)) + D_{Cl,b} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(c_b)) \cdot \\ & - (R_{Cl} \cdot c_f(B) \cdot D_{cap} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(H)) \end{aligned} \quad (EQ. 3.45)$$

$D_{Cl,b}$	[mm <sup>2</sup> /s] coefficient de diffusion des ions chlorures liés à la pâte de ciment,
$D_{Cl}$	[mm <sup>2</sup> /s] coefficient de diffusion des ions chlorures dans l'eau,
$c_b$	[kg/m <sup>3</sup> ] concentration en ions chlorures capturés par la pâte de ciment rapportée au volume de la solution.

Le coefficient de diffusion des ions chlorures liés à la pâte de ciment est nul, ce qui simplifie la dernière équation (EQ. 3.45). Dans la partie de gauche, la variation temporelle des ions chlorures totaux demeure. Dès lors, les ions chlorures totaux sont changés en ions chlorures libres (§ A.5.7.4). Cela ne signifie pas que la variation des ions chlorures totaux dans le temps n'est pas prise en considération, mais que l'équilibre entre ions chlorures totaux et les ions chlorures libres et liées est résolu à la fin de chaque intervalle de temps (EQ. 3.46).

$$\frac{\partial}{\partial t} c_f(B) = \text{div}(R_{Cl} \cdot c_f(B) \cdot D_h(T) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(H) + D_{Cl} \cdot w \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(c_f(B))) - (R_{Cl} \cdot c_f(B) \cdot D_{cap} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(H)) \quad (EQ. 3.46)$$

A la fin de chaque pas de calcul, les ions chlorures totaux sont calculés prenant en considération la carbonatation et la température (EQ. 3.46) [Lindvall01] [Ritthichauy01] [Sugiyama03] [Tang96] [Tang96c].

$$\gamma = e^{\alpha_{OH} \cdot (1 - 10^{pH - pH_{ini}})} \cdot e^{\frac{Eb}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o}\right)} \cdot \alpha \cdot C \cdot 3.57 / 1000 \quad (EQ. 3.47)$$

- $\alpha_{OH}$  [°C] énergie d'activation du modèle, valant 0.56,  
 $Eb$  [mol/J] énergie d'activation du modèle d'Arrhénius,  
 $R$  [J/mol.°C] constante des gaz, valant 8.314510,  
 $T_o$  [°C] température de référence du modèle d'Arrhénius,  
 $\alpha$  [-] degré d'hydratation du béton,  
 $C$  [kg/m<sup>3</sup> de béton] quantité de ciment.

### 3.1.6.1 Diffusion des ions chlorures dans l'eau

La diffusion des ions chlorures dans l'eau est prise en considération par la loi de Fick (§ A.5.7, EQ. 3.46 et EQ. 3.48).

$$\frac{\partial}{\partial t} c_f(B) = \text{div}(D_{Cl} \cdot w \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(c_f(B))) \quad (EQ. 3.48)$$

La composition de la recette du béton, représentée par le rapport massique de l'eau sur le ciment (Figure 3.17), peut être prise en compte avec le coefficient de diffusion. Une étude effectuée dans le cadre de ce travail de recherche met en relation ce rapport avec le coefficient de diffusion découlant d'un grand nombre d'essais [Persson04] [Bentz00a] [Kirkpatrick02] [Halamickova95] [Marchand02] [Marchand02c] [Marchand01a] [Tang96] [Morris01] [Callanan03]. Cette étude est comparée à d'autres essais (Figure 3.17) [MacDonald95] [Ngala95]. Le coefficient de diffusion dépend de la composition du béton (Figure 3.17 et EQ. 3.49) mais également de la température selon la loi d'Arrhénius [Zhang05].

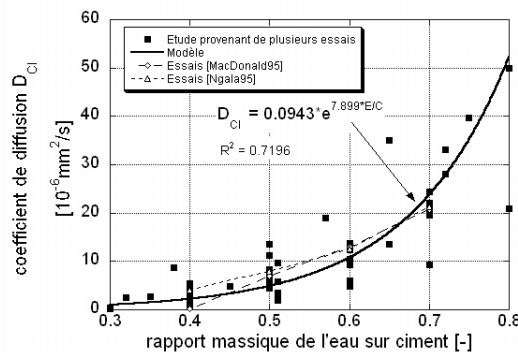


FIGURE 3.17: Influence du rapport massique de l'eau sur le ciment sur la concentration des ions chlorures exposée à une atmosphère en milieu marin, étude de la littérature sur le coefficient de diffusion des ions chlorures dans l'eau en fonction du rapport massique de l'eau sur le ciment.

$$D_{Cl} = 0.0943 \cdot e^{7.899 \cdot E/C} \cdot e^{\alpha \cdot (T - T_0)} \quad (EQ\ 3.49)$$

$E/C$  [-] rapport massique de l'eau sur le ciment.

$\alpha$  [ $^{\circ}C^{-1}$ ] énergie d'activation du modèle, valant 0.026,

$T_0$  [ $^{\circ}C$ ] température de référence du modèle d'Arrhénius, valant 20 $^{\circ}C$ .

### 3.1.6.2 Entraînement des ions chlorures par l'eau liquide et sous forme de vapeur

L'entraînement des ions chlorures par l'eau s'effectue avec le mouvement de la vapeur d'eau et le mouvement de l'eau liquide par succion capillaire. Le cas d'entraînement des ions chlorures par succion capillaire de l'eau liquide est le phénomène le plus rapide pour l'avancement du front des ions chlorures dans le béton d'enrobage [Nilsson96] [Schiegg02]. La prise en compte du mouvement avec la vapeur d'eau est gérée avec l'équation de diffusion de Fick et l'entraînement des ions chlorures avec les équations de la cinétique (EQ. 3.46 et EQ. 3.50).

$$\frac{\partial}{\partial t} c_f(B) = \text{div}(R_{Cl} \cdot c_f(B) \cdot D_h(T) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(H)) - (R_{Cl} \cdot c_f(B) \cdot D_{cap} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(H)) \quad (EQ\ 3.50)$$

Le front des ions chlorures présente un certain retard par rapport au front de l'eau (§ A.5.7.2). Le coefficient de retard  $R$  se situe proche de 0.7 (EQ. 3.51) [Lunk98]. Ce coefficient de retard est un paramètre encore peu connu et, en l'absence d'essais plus approfondis, ce coefficient est appliqué avec la même grandeur pour l'entraînement des ions chlorures par la vapeur d'eau et par l'eau liquide.

$$R_{Cl} = 1 - R \quad (EQ\ 3.51)$$

$R$  coefficient de retard selon le modèle de Lunk.

La résolution de l'équation de base de l'entraînement des ions chlorures par l'eau considère la vitesse sur chaque noeud (§ A.5.7.4 a). La concentration des ions chlorures sur chaque noeud subit une translation [Roelfstra00] [Roelfstra01]. Lorsque la translation n'est pas uniforme sur les noeuds, le bilan de conservation n'est plus respecté. Une démarche de résolution différente est proposée pour palier à ce problème avec un algorithme original (Annexe E.4).

### 3.1.6.3 Validation du modèle de transport des ions chlorures

Déjà mentionné auparavant (§ 3.1.5.1), un essai a permis la mesure de la concentration des ions chlorures dans une éprouvette confectionnée selon un béton de perméabilité B (§ 3.2.1) [Laferrriere05]. La position du capteur se situe à 20 millimètres de profondeur dans le béton d'enrobage (Figure 3.18 a).

Les résultats des mesures et du modèle présentent une superposition après 8 jours, ce qui démontre une réponse correcte du modèle pour des valeurs à long terme. A plus court terme, la mise en évidence de la rapidité du front des ions chlorures sont observées de manière équivalente par les mesures en laboratoire et les résultats de simulations. La vitesse d'augmentation de la concentration des ions chlorures lors du passage du front est égale si l'on compare le modèle aux mesures en laboratoire. Par contre, l'amorçage ou l'instant de passage de ce front diffère de plusieurs heures si l'on compare le modèle aux mesures en laboratoire. Cette différence peut provenir du coefficient de retard, du mode de compactage. Le coefficient de retard est un paramètre méconnu pour ce type de béton et prend dans la présente étude la valeur de 0.7. Les paramètres du modèle TransChlor sont obtenus à partir d'un béton vibré avec une aiguille, alors que le compactage de l'éprouvette a été obtenu par vibration du coffrage (Figure 3.18 b).

De plus, on peut noter que l'épaisseur d'enrobage mesurée du capteur est de 18 millimètres alors que les résultats des simulations sont obtenus à 20 millimètres.

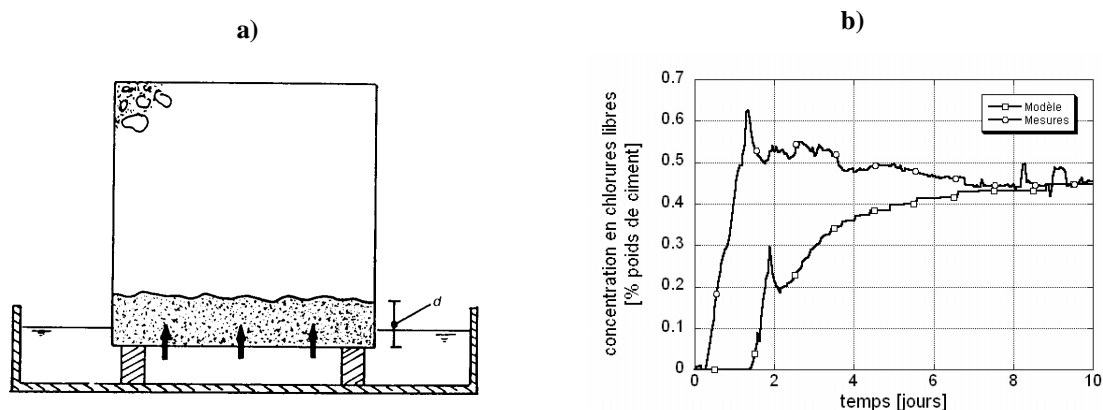


FIGURE 3.18: Essai de capillarité sur une éprouvette avec un capteur d'ions chlorures à fibres optiques [Laferriere05], a) schéma de la procédure d'essai [McCarter95], b) comparaison des résultats entre le modèle TransChlor et les essais de capillarité.

Le modèle et les mesures mettent très bien en évidence le front des ions chlorures qui se répercute par une ascension brutale des ions chlorures. Ce front est marqué par un pic devenant plus important lorsque l'on se rapproche de la surface, selon les simulations avec TransChlor. Ce pic pourrait être dû à une sursaturation des pores due à un passage rapide de bulles d'air, car la concentration en ions chlorures est rapportée à la teneur en eau (Figure 3.18 b). Or, ce pic disparaît dès que l'on se situe en-dehors de la zone de respiration (§ A.4.3).

## 3.2 Campagne expérimentale

La campagne expérimentale a pour premier objectif de mettre en évidence la capillarité sous des conditions microclimatiques réelles des structures. Au préalable de cet essai, le mode préparatoire et le conditionnement des éprouvettes ont permis de mesurer d'autres modes de transport comme les échanges thermiques et le transport de vapeur d'eau lors du séchage des éprouvettes. Ainsi la modélisation des différents modes de transport (§ 3.1) s'appuie sur cette partie expérimentale. Elle permet la quantification des échanges thermiques et du transport d'eau entre l'atmosphère et le cœur du béton. Le déroulement des essais se divise en six étapes distinctes (Tableau 3.5).

Travaux	Caractéristiques, commentaires
1. Bétonnage <i>essai sur le béton frais</i>	Choix de la recette des bétons Ouvrabilité avec l'essai d'affaissement
2. Décoffrage <i>essais destructifs</i>  <i>essais non destructifs</i>	Compression sur cube (SIA 162/1), porosité, masses volumiques apparentes et absolues, adsorption d'eau par capillarité (DIN 52.617) Essais de perméabilité à l'air Torrent et de résistivité électrique Wenner (SIA 262/1)
3. Confection des éprouvettes	Carottage et sciage
4. Equilibre hydrique <i>saturation sous vide</i> <i>séchage</i>	Saturation de quelques éprouvettes Séchage de toutes les éprouvettes pour l'obtention du coefficient de diffusion hydrique de vapeur d'eau
5. Etanchement	Etanchement des faces des éprouvettes avec un moule et une résine étanche
6. <b>Succion capillaire</b> <i>refroidissement à l'air</i> <i>immersion des éprouvettes</i>	Obtention du coefficient de diffusion thermique Obtention du coefficient de transport d'eau liquide par capillarité

TABLEAU 3.5: Etapes et déroulement des différents travaux de laboratoire, d'après [Conciatori05]



Les trois premières étapes, ainsi que la cinquième sont des travaux liés à la confection des éprouvettes pour les essais. Les travaux préliminaires entrepris en préambule de ces essais permettent l'établissement des différentes recettes de béton. Ces recettes de béton sont confectionnées avec un ciment portland de type I. La quatrième étape, étape durant laquelle le poids des éprouvettes est enregistré à intervalle régulier, permet de définir des coefficients de diffusion de vapeur d'eau à température constante. Finalement la sixième et dernière étape se concentre sur la succion capillaire de l'eau liquide à différentes températures. Durant cette étape, le transfert thermique et l'évolution du poids de l'échantillon sont étudiés.

### 3.2.1 Recettes des bétons testés

Trois choix de recettes différentes de béton permettent de prendre en considération la variabilité des matériaux mis en oeuvre dans les ouvrages existants. Le rapport massique de l'eau sur le ciment est le principal paramètre pour les différentes recettes de béton (Tableau 3.6). Les trois recettes sont différenciées par la suite selon une dénomination,

- béton A : recette de béton avec un rapport massique de l'eau sur le ciment de 0.42,
- béton B : recette de béton avec un rapport massique de l'eau sur le ciment de 0.52,
- béton C : recette de béton avec un rapport massique de l'eau sur le ciment de 0.73.

Le béton de perméabilité C a été confectionné avec une composition granulométrique différente des deux autres bétons. Les granulats de diamètre entre 0 et 4 [mm] ont été extraits d'un lac et contiennent ainsi moins de fines. Les trois recettes de béton ont montré une bonne ouvrabilité. Cette ouvrabilité a été mise en évidence par l'essai d'affaissement (Tableau 3.6). L'ajout d'un adjuvant pour le béton de perméabilité A a également permis d'obtenir une très bonne ouvrabilité malgré une composition avec très peu d'eau.

Perméabilité	Dosage en ciment [kg/m <sup>3</sup> ]	Eau [l/m <sup>3</sup> ]	Rapport eau sur ciment E / C	Masse des granulats [kg/m <sup>3</sup> ]	Masse volumique du béton [kg/m <sup>3</sup> ]	Quantité d'adjuvant [l/m <sup>3</sup> ]	Affaissement du cône d'Abrams [cm]
Béton A	375	154	0.42	1917	2450	4	1
Béton B	375	196	0.52	1813	2384	-	4
Béton C	250	184	0.73	1953	2387	-	4.5

TABLEAU 3.6: Récapitulatif des trois recettes de béton [Conciatori05].

### 3.2.2 Résistance à la compression des bétons testés

La résistance à la compression sur cylindre a été mesurée à 28 jours. Le béton de perméabilité A se situe dans la catégorie d'un béton C50/60 (résistance de 56.3 et 57.1 [N/mm<sup>2</sup>]), le béton de perméabilité B à un C40/50 (résistance de 43.3 et 42.1 [N/mm<sup>2</sup>]) et le béton de perméabilité C à un C25/30 (résistance de 27.2 et 26.3 [N/mm<sup>2</sup>]), selon la norme SIA 262.

### 3.2.3 Evaluation de la porosité des bétons

Les essais de porosité montrent un taux de porosité plus importante pour le béton de perméabilité B que pour les deux autres bétons de perméabilités A et C. Ce résultat est également démontré lors de la mesure de la teneur en eau saturée du béton durant le séchage des éprouvettes en béton. La connectivité des pores capillaires est mise en évidence grâce aux essais de perméabilité à l'air Torrent et aux essais de résistivité électrique Wenner. La connectivité entre les pores capillaires est plus importante pour le béton de perméabilité C, suivi par le béton de perméabilité B et finalement le béton de perméabilité A. Cette connectivité est un paramètre important puisqu'il conditionne la facilité d'inclusion et de transport d'eau, de sulfate, de gaz et de chlorures dans le béton. La porosité joue plutôt un rôle de réservoir ou de stockage où ces agents nocifs extérieurs peuvent réagir avec les différents composants du béton.

### 3.2.3.1 Essai de perméabilité à l'air Torrent et de résistivité électrique Wenner

La perméabilité à l'air  $k_T$  du béton d'enrobage est déterminée à l'aide de l'appareil TORRENT Permeability Tester [PROCEQ97] [Torrent92]. La mesure est réalisée au moyen d'une cellule à vide à deux chambres appliquée sur la surface du béton au moyen de joints toriques en caoutchouc et qui est reliée à un pressostat (unité de réglage), lui-même relié à une pompe à vide. La mesure elle-même consiste à imposer un vide d'air dans la chambre interne et à mesurer l'augmentation de pression dans un temps donné. Cette augmentation de pression correspond à l'air qui pénètre dans la chambre au travers du béton. Elle caractérise la perméabilité à l'air de ce dernier [Denarié04].

Un appareil de mesure préprogrammé permet de déduire la perméabilité à l'air  $k_T$ , à partir de la différence de pression mesurée. La mesure de perméabilité à l'air étant sensible à l'humidité du béton, on tient compte de cet effet en mesurant en parallèle et au même point la résistivité électrique du béton (Essai Wenner). Un abaque (Figure 3.19) permet de déterminer la classe de qualité du béton d'enrobage connaissant sa perméabilité à l'air et sa résistivité électrique, à une température de 20°C [Denarié04].

Les résultats des essais peuvent être étudiés en tenant compte de l'humidité présente dans le béton ou en corrigeant les valeurs de mesure  $KT_i$  par  $KT_{i,corr}$  (EQ. 3.52). Sous forme de nuage de points, les résultats  $KT_i$  sont affichés à l'état brut (Figure 3.19). Puis les résultats alignés sur une ligne horizontale prennent en considération l'humidité du béton (les résultats d'essai ne sont donc plus dépendant de la résistivité électrique). Chaque point de ces lignes horizontales représente le minimum des deux valeurs de  $KT_i$  et de  $KT_{i,corr}$ . Finalement, le point mis en évidence sur cette même ligne est la moyenne géométrique des mesures corrigées (Figure 3.19) [Denarié05].

$$KT_{i,corr} = 3.5 \cdot \frac{(kT_i)^{0.57}}{\rho} \quad (EQ. 3.52)$$

$KT_{i,corr}$  [ $10^{-16}m^2$ ] coefficient de perméabilité à l'air, corrigé grâce aux essais de résistivité électrique Wenner,

$KT_i$  [ $10^{-16}m^2$ ] coefficient brut de perméabilité à l'air,

$\rho$  [ $k\Omega cm$ ] résistivité électrique, déterminé par l'essai Wenner.

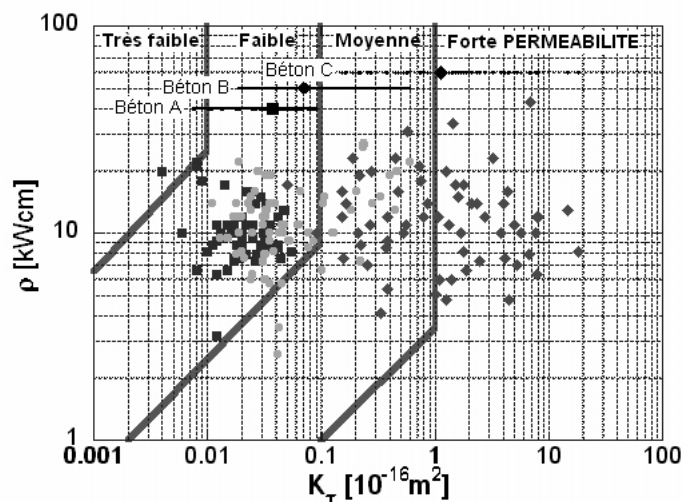


FIGURE 3.19: Mesures brutes et corrigées des essais de perméabilité à l'air de Torrent avec les moyennes géométriques correspondantes, catégories de perméabilité d'après [Conciatori05]

La perméabilité du béton d'enrobage des différents murets décroît avec une diminution du rapport massique de l'eau sur le ciment. Ainsi, dans l'ordre décroissant, le béton de perméabilité A est moins perméable que le béton de perméabilité B et que finalement le béton de perméabilité C (Tableau 3.7).

Cependant, l'écart entre le béton de perméabilité A et le béton de perméabilité B est minime et ne corréle pas de manière linéaire avec le rapport massique de l'eau sur le ciment. La disparité des mesures augmente avec une perméabilité plus importante du béton (Tableau 3.7). Cette disparité peut être visualisée en utilisant une fonction probabiliste lognormale (Figure 3.20) [Conciatori05].

	$kT$ [ $10^{-16} \text{ m}^2$ ]	$s_{kT}$ [ $10^{-16} \text{ m}^2$ ]
Béton A	0.037	1.651
Béton B	0.071	2.347
Béton C	1.116	3.894

TABLEAU 3.7: Moyenne  $kT$  et écart type  $s_{kT}$  géométrique des mesures de perméabilité Torrent (provenant d'une loi probabiliste lognormale [Conciatori05])

La perméabilité à l'air varie très peu pour les bétons de perméabilités A et B, tandis que pour le béton de perméabilité C, la valeur du coefficient de perméabilité à l'air est dix fois supérieure aux deux autres.

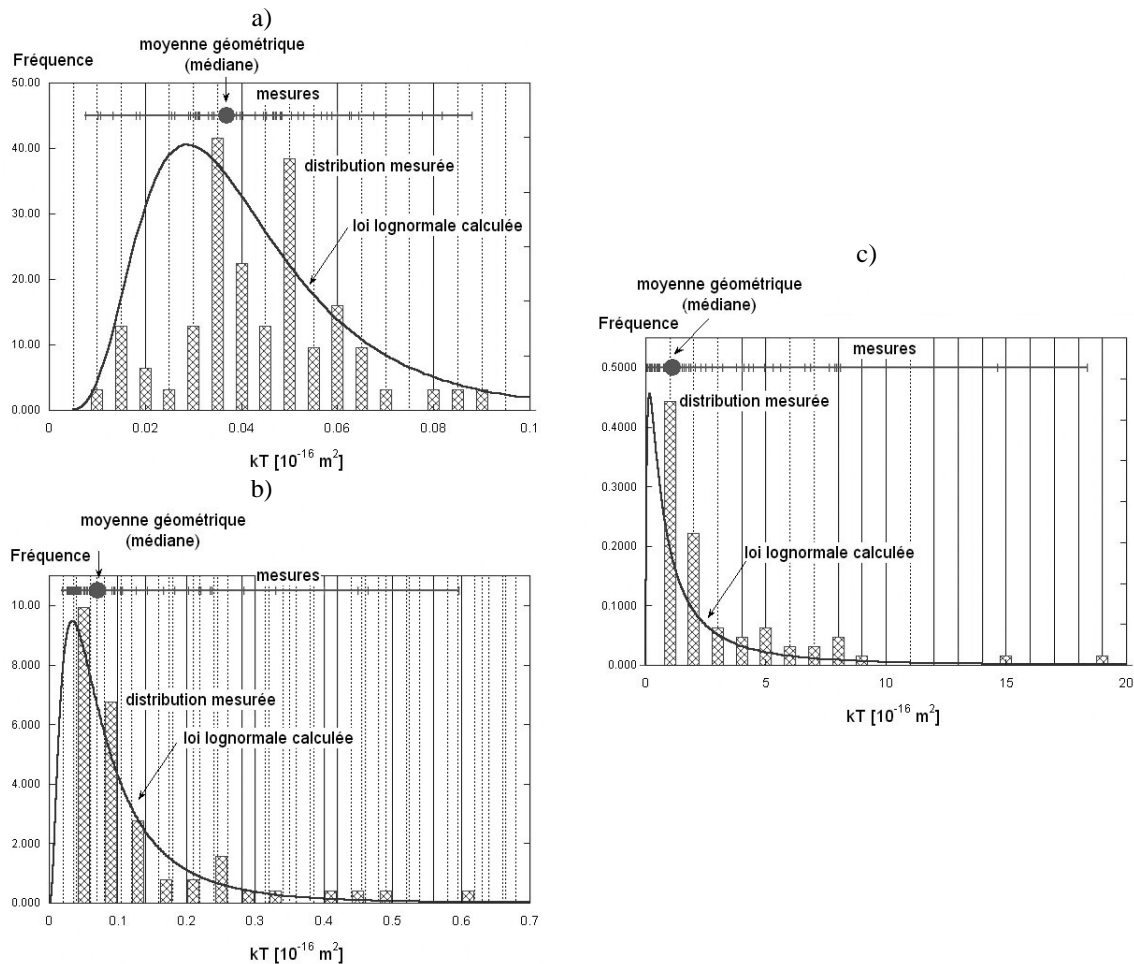


FIGURE 3.20: Traitement probabiliste des essais de perméabilité Torrent [Conciatori05], a) béton de perméabilité A, b) béton de perméabilité béton B, c) béton de perméabilité béton C.

### 3.2.3.2 Refroidissement des éprouvettes

Un refroidissement à l'air, à différents niveaux de température, est exécuté sur toutes les éprouvettes testées à l'adsorption de saumure par capillarité. Les éprouvettes, à température du laboratoire de 20°C au stade initial, sont refroidies à température constante dans un congélateur. Indépendamment de ces

essais, plusieurs éprouvettes ont été équipées de capteur afin de contrôler les températures au coeur des éprouvettes avant les essais d'adsorption d'eau par capillarité. Une isolation thermique autour de l'éprouvette et du capteur garantit un transfert thermique depuis une seule face de l'éprouvette et ainsi de façon unidirectionnelle (Figure 3.22).

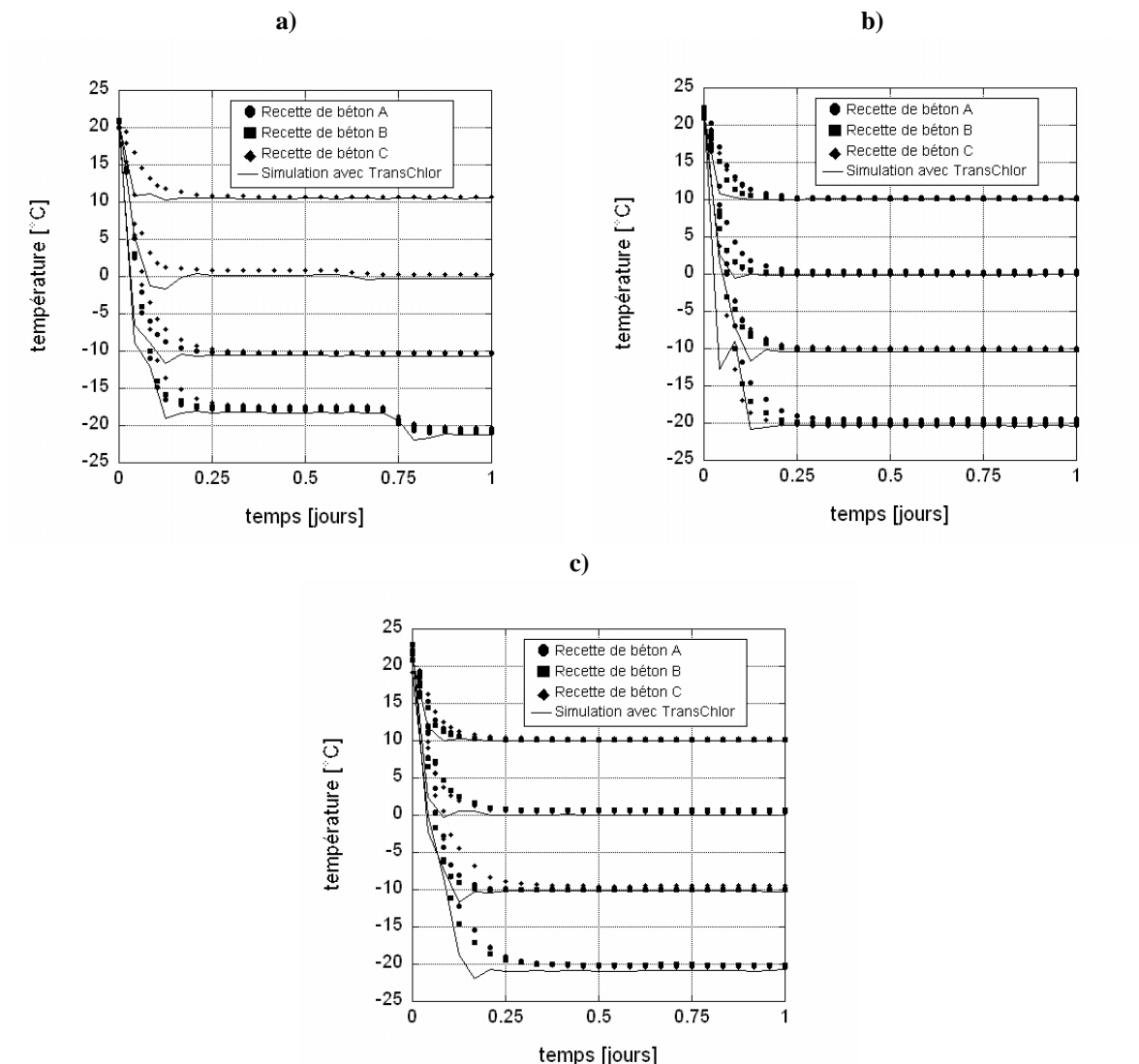


FIGURE 3.21: Simulation avec TransChlor et comparaison avec les mesures en laboratoire pour la diffusion thermique pour les différentes perméabilités de béton [Conciatori05].

Les résultats des mesures en laboratoire montrent une vitesse transfert thermique équivalente pour toutes les perméabilités de béton, soit pour différentes teneurs en eau dans le béton. Les simulations avec le modèle TransChlor montrent également cette tendance, puisque ni la perméabilité du béton, ni la teneur en eau dans le béton ont montré une relation avec la vitesse de transfert thermique. Si aucune tendance n'a pu être mise en évidence, la variabilité du matériau est mise en exergue par les résultats d'essais (Figure 3.21). Ainsi, la vitesse de transfert thermique dans le béton dépend essentiellement des caractéristiques du squelette du béton constitué par la pâte de ciment et les granulats. Par contre, la teneur en eau dans le béton n'influence pas cette vitesse de transfert dans le béton d'enrobage.

La durée d'atteinte de l'équilibre thermique dépend principalement du gradient de température. Pour le béton d'enrobage, à une profondeur de 25 à 30 millimètres, cet équilibre est atteint après 4 à 5 heures. Ainsi l'hypothèse adoptée par de nombreux chercheurs d'utiliser la température de l'atmosphère environnante peut être suffisante selon la discrétisation du temps du modèle analytique. La comparaison

entre les résultats de mesures en laboratoire et les résultats du modèle TransChlor montre une rapidité de transfert thermique légèrement plus importante pour le modèle (Figure 3.21).



FIGURE 3.22: Epreuve équipée d'un capteur PT100 avec son enveloppe de sagex [Conciatori05].

### 3.2.3.3 Séchage des éprouvettes

Le séchage des éprouvettes s'effectue dans une enceinte protégée où la température et l'humidité relative de l'air sont contrôlées. Dès l'entreposage dans ces enceintes, l'évolution du poids des éprouvettes est mesurée. Les essais prennent fin lorsqu'il y a stabilisation du poids dans les éprouvettes. Trois configurations différentes de séchage sont testées : atmosphère avec une humidité relative à 74.7%, 56.7% et 27.9%. Ces trois niveaux de séchage sont représentés par la suite par leur valeur cible, soit respectivement, 75%, 50% et 25%. Le séchage des éprouvettes s'est déroulé à deux niveaux hydriques initiaux différents soit : des éprouvettes saturées sous vide et des éprouvettes sans aucun traitement (Figure 3.23).

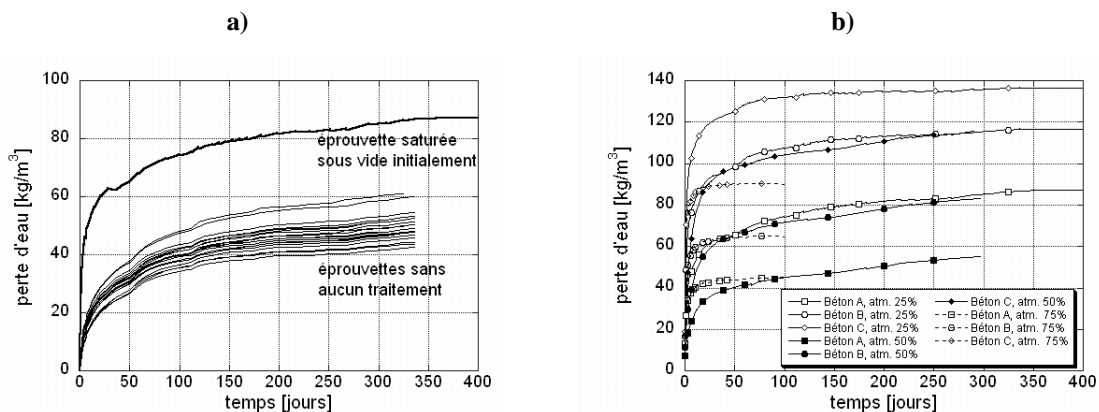


FIGURE 3.23: Résultats d'essai, les pertes d'eau dans les échantillons rapportées au temps [Conciatori05], a) Atmosphère de confinement 25% et pour le béton de perméabilité A, b) Epreuves saturées initialement sous vide.

Les coefficients de diffusion de vapeur d'eau sont obtenus en comparant, grâce à une méthode de moindres carrés, les simulations avec les résultats d'essais obtenus en laboratoire (Tableau 3.8). Les paramètres du modèle de Bazant peuvent être choisis de manière aléatoire car, pour toutes les configurations, l'ajustement est de même qualité. Le manque d'informations sur la variation spatiale de l'humidité relative dans le béton d'enrobage met en évidence cet aspect dans les paramètres du modèle de Bazant (§ A.5.5.2). Par contre, le changement de paramètres du modèle de Bazant (§ 3.1.4) permet après itérations d'obtenir des valeurs proches de la littérature [Roelfstra89] [Delagrave96] [Dhir93] [Halamickova95] [Roelfstra01] [Janz97] [Johanesson98] [Lunk98] [Oberbeck95]. Malheureusement, les valeurs des essais en laboratoire ne peuvent pas être retenues comme fiables, ceci à cause d'un pro-

blème de microfissuration qui est survenu sur les éprouvettes saturées initialement sous vide lors du séchage, explicité ci-après. Par contre, la variabilité des mesures peut être prise en considération (§ 4.2).

Type de béton	Paramètre du modèle de Bazant $n=4$ , $h_c=0.75$ et $\alpha=0.05$		Paramètre du modèle de Bazant $n=4$ , $h_c=0.85$ et $\alpha=0.005$	
	Moyenne [ $10^{-5}\text{mm}^2/\text{s}$ ]	Ecart-type [ $10^{-5}\text{mm}^2/\text{s}$ ]	Moyenne [ $10^{-5}\text{mm}^2/\text{s}$ ]	Ecart-type [ $10^{-5}\text{mm}^2/\text{s}$ ]
Béton A	5.316	7.762	31.64	23.63
Béton B	4.693	3.169	29.76	21.421
Béton C	4.904	2.998	32.65	24.201

TABLEAU 3.8: Résultats sous forme de moyenne et écart-type des coefficients de diffusion de vapeur d'eau, après ajustement avec les essais en laboratoire.

Pour les éprouvettes saturées sous vide, la perte d'eau a été anormalement élevée quelque soit les conditions de séchage, voire supérieure à la porosité du béton [Conciatori05]. Cette perte d'eau élevée, durant les essais sur les éprouvettes, peut s'expliquer par une microfissuration durant l'exécution de la mise en saturation sous vide des éprouvettes [Conciatori05].

Cette microfissuration a été mise en évidence en effectuant un examen microscopique sur lame mince pour le béton de perméabilité C [Conciatori05]. Globalement, les caractéristiques de microstructure sont voisines pour les bétons traités sous vide ou non traités sous vide. Cependant, quelques différences sont apparues, comme par exemple une capillarité légèrement plus forte pour les bétons traités sous vides, ceci certainement due à une microfissuration très fine développée dans la pâte de ciment. Une fissuration en surface du béton un peu plus fréquente (de 1 à 10 microns d'ouverture) s'est développée dans les bétons traités sous vide. Ces résultats convergent avec d'autres essais effectués auparavant dans une étude de faisabilité du projet de Suisse Métro [Hammerschlag05].

Aussi, une correction de ces quantités d'eau évaporée est proposée sous la forme d'une diminution des valeurs des essais par une constante. L'écart de cette correction est obtenu en minimisant la moyenne des gains en eau selon les essais de capillarité par rapport aux trois niveaux de séchage.

La teneur en eau à l'état de saturation de chaque éprouvette est obtenue par l'intermédiaire d'une approche probabiliste. La porosité ou la teneur en eau à l'état de saturation est obtenue par des essais sur des éléments d'éprouvettes [Conciatori05]. A partir de ces résultats d'essais, il est possible de construire une loi normale. Dans une deuxième phase, le gain d'eau basé sur le test de capillarité est également connu pour chaque éprouvette et comporte également une certaine variabilité. Cette dernière variabilité est combinée de manière linéaire à la variabilité obtenue par le test de porosité et ainsi, la teneur en eau à l'état de saturation est connue pour chaque éprouvette.

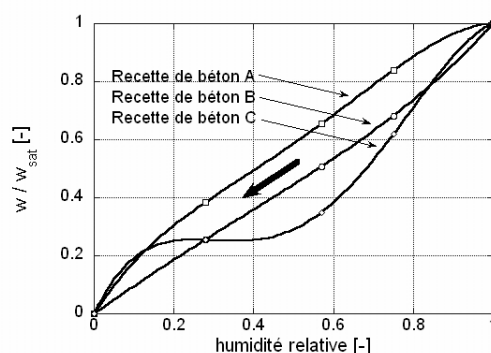


FIGURE 3.24: Courbes de l'isotherme de désorption pour les trois perméabilités de béton [Conciatori05].

En connaissant la teneur en eau à l'état de saturation, il est alors possible de connaître la teneur en eau à chaque étape des essais. Cependant, cette teneur en eau est une teneur en eau moyenne sur tout le volume de l'éprouvette. En prenant comme hypothèse que les niveaux de séchages moyens sont atteints, il est possible de construire les isothermes de désorption pour chaque perméabilité de béton (Figure 3.24) à partir des données des échantillons saturés sous vide avec correction des valeurs.

A l'aide du logiciel Heat-MLS, des simulations de séchage dans les mêmes conditions qu'en laboratoire ont été effectuées afin d'obtenir un coefficient de diffusion provenant d'une loi de diffusion de Fick [Femmasse04]. Malheureusement, la microfissuration de la pâte de ciment pour les éprouvettes saturées sous vide et les hypothèses de réduction de la porosité ne fournissent qu'un résultat approximatif du séchage, puisqu'on ne note pas de différence de vitesse de séchage entre les différentes perméabilités de béton selon les simulations.

### 3.2.3.4 Essais de capillarité

L'adsorption par capillarité est la phase la plus importante de ces essais en laboratoire. Les éprouvettes, séchées préalablement, puis refroidies à l'air, sont introduites dans un bain salin froid. Ces conditions sont voisines de celles des bétons d'ouvrage d'art durant les périodes hivernales. Comme par exemple pour le refroidissement à l'air (§ 3.2.3.2), les mêmes niveaux de température ont été appliqués soit les niveaux de température suivants :  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$  et  $10^{\circ}\text{C}$  (Figure 3.25). Une méthode de calcul originale a été utilisée pour prendre en considération l'absence de mesures pendant les premières secondes suivant l'introduction des éprouvettes dans le bain salin en utilisant le principe d'Archimède [Conciatori05].

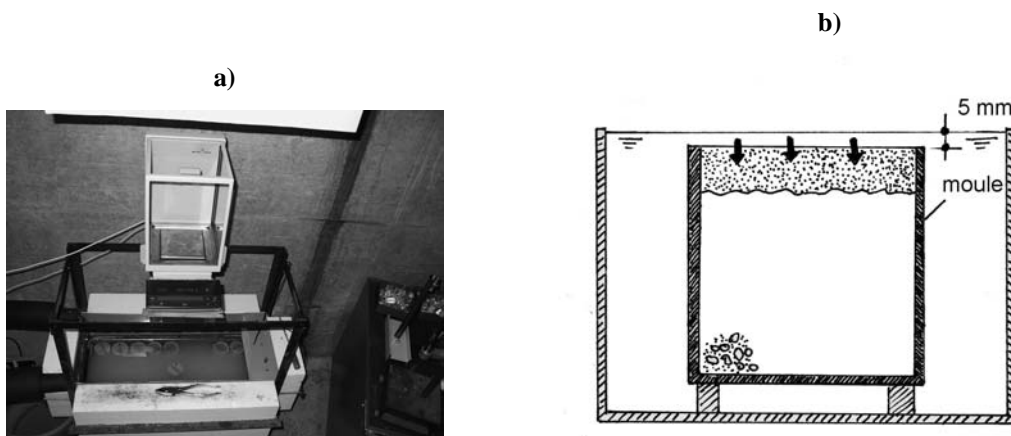


FIGURE 3.25: Condition des essais en laboratoire pour l'essai de capillarité a) photo du bâti contenant le bain, la balance et les éprouvettes immergées, b) schéma des essais de capillarité.

L'épandage hivernal de produits de déverglaçage s'effectue régulièrement sur les chaussées sous forme solide ou de saumure. La variabilité spatiale et temporelle est grande et il est difficile de tirer, à priori, une règle générale (§ A.2, § 2.2 et § 2.4.3). Ainsi, une saturation maximale a été choisie dans le cadre de ces essais en laboratoire, soit à 27% de chlorures de sodium dans l'eau.

Les coefficients de capillarité (§ 3.1.5) sont obtenus en comparant par une méthode de moindres carrés les simulations et les résultats d'essais obtenus en laboratoire (Figure 3.26 a). Les coefficients de capillarité sont valides pour les températures supérieures à  $-20^{\circ}\text{C}$  (Figure 3.26 b à d). A ce niveau de température, la saumure a commencé à changer de phase et de masse volumique ce qui a faussé les valeurs des essais dès ce niveau de température [Conciatori05].

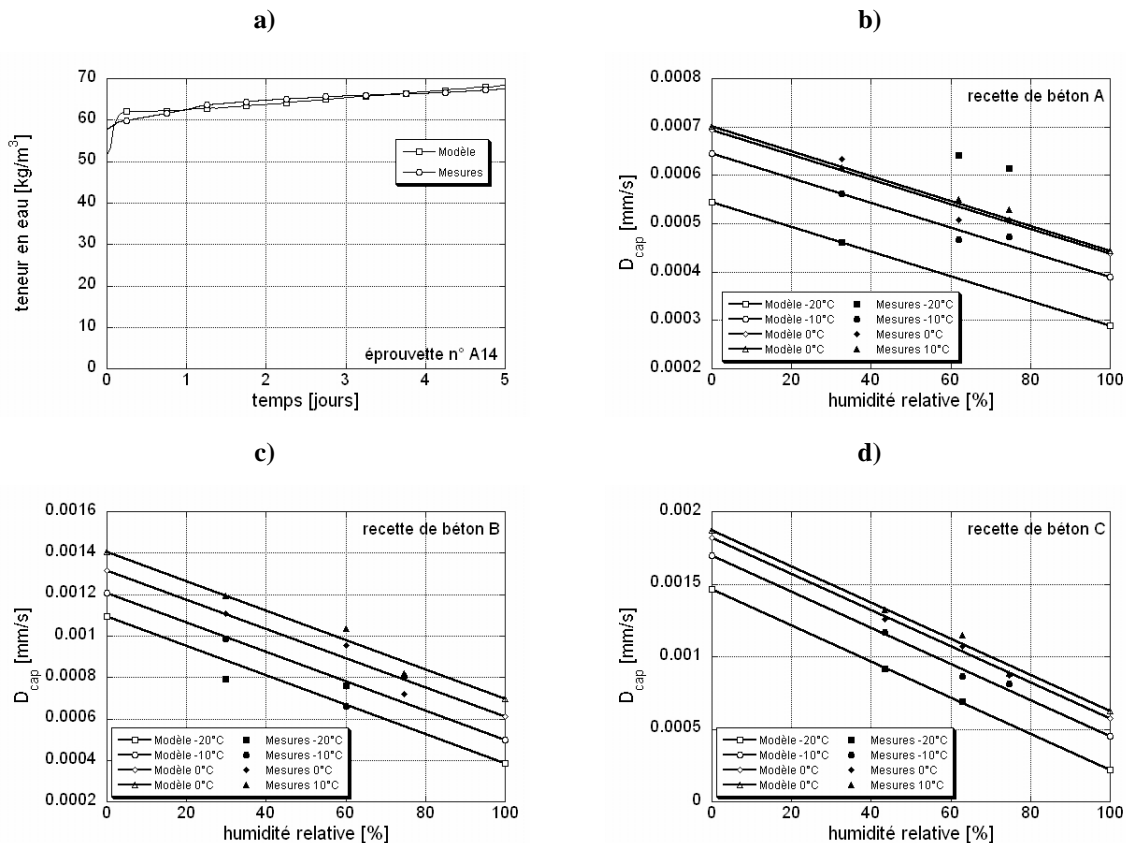


FIGURE 3.26: Calibration du modèle avec les essais, a) Comparaison de l'évolution temporelle de la teneur en eau et calibration par la méthode des moindres carrés b) c) et d) Comparaison du coefficient de capillarité entre le modèle et les mesures pour les trois béton de perméabilités A, B et C.

### 3.2.3.5 Imprégnation hydrophobe

Plusieurs échantillons confectionnés selon les trois recettes de béton ont été traité par une imprégnation hydrophobe de Nanofluide 5<sup>®</sup> [Durrer04]. Ces échantillons ont été au préalable du traitement séchés à une humidité relative environnante de 75%. Pour les éprouvettes avec une imprégnation hydrophobe au Nanofluide 5<sup>®</sup>, le comportement est différent de celui des bétons usuels. Une quantité d'eau s'introduit dans les éprouvettes durant seulement les premières secondes où celles-ci sont en contact avec la saumure. Puis, l'eau liquide ne s'introduit plus dans les éprouvettes et le poids mesuré demeure constant. Le degré d'adsorption est le même pour toutes les recettes de béton effectuées. De même, la température n'influence pas la succion capillaire de l'eau liquide dans les échantillons avec imprégnation hydrophobe au Nanofluide 5<sup>®</sup> (Figure 3.27). La quantité d'eau adsorbée est 5x moins importante pour un béton imprégné avec un produit hydrophobe Nanofluide 5<sup>®</sup> que pour un béton de perméabilité A. En effet, la capacité maximale d'adsorption fut d'environ 6 kg/m<sup>3</sup>, pour le béton de perméabilité avec une imprégnation hydrophobe alors qu'elle valait 30 kg/m<sup>3</sup> sans imprégnation ceci pour un béton de perméabilité A et pour des domaines de température supérieure à 0°C [Conciatori05].

Une imprégnation hydrophobe réduit le coefficient de capillarité. Dès lors, ce coefficient de capillarité ne dépend plus de la composition du béton, de la température ou de l'humidité relative dans les pores du béton. Par contre, l'effet sur le mouvement de la vapeur n'a pas été mesurée par ces essais. Aussi, l'hypothèse peut être faite que ce traitement n'est pas une barrière à la vapeur d'eau.



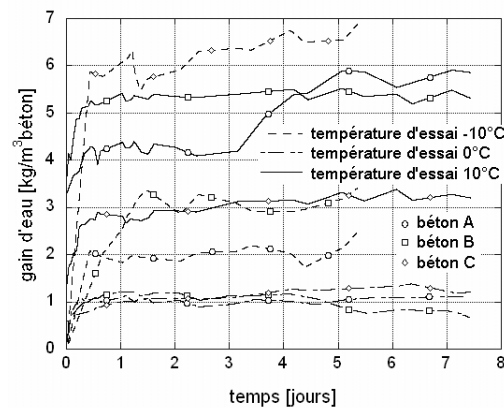


FIGURE 3.27: *Succion capillaire des éprouvettes imprégnées avec le produit Nanofluide 5<sup>©</sup>* [Conciatori05].

### 3.3 Sollicitations par le microclimat et les substances agressives, et résistance du béton d'enrobage

En période hivernale, les sels de déverglaçage sont épandus sur la chaussée et ainsi les ions chlorures entrent en contact avec la vapeur d'eau sur toute la structure. Lors des périodes de précipitations et en présence de sel de déverglaçage, les ions chlorures sont rapidement introduits dans le béton d'enrobage, puis en profondeur. Sans la présence de produits de déverglaçage mais en période de précipitations, les ions chlorures sont rapidement déplacés en profondeur (Figure 3.28).

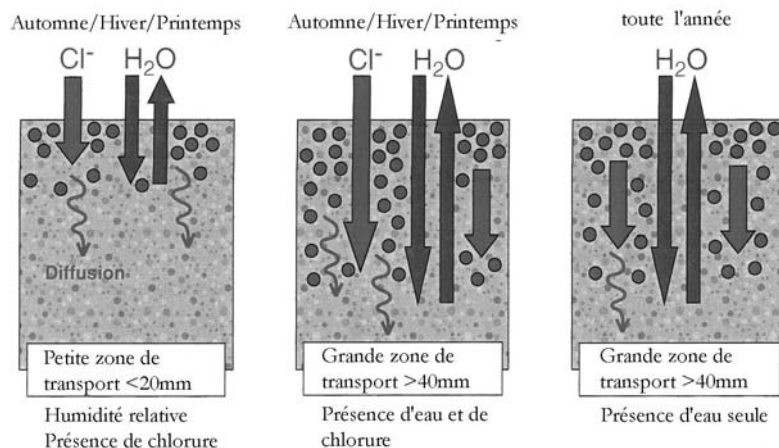


FIGURE 3.28: *Influence des saisons et de l'exposition sur le transport des ions chlorures dans le béton d'enrobage* [Schiegg04].

Avec les variations saisonnières, les profils d'ions chlorures peuvent complètement changer de physionomie et avoir, au droit de l'armature, des concentrations importantes durant les périodes hivernales et des concentrations modestes en été due à une diffusion plus importante des ions chlorures. Selon le contact avec l'eau liquide ou de vapeur d'eau, la variation spatiale de la teneur en eau se développe différemment. Ceci a une incidence directe sur le transport des ions chlorures par l'eau (Figure 3.29).

Les différents transferts dans le béton d'enrobage sont mis en évidence par simulation avec le modèle TransChlor (Figure 3.30). Les variables discutées et analysées sont le microclimat, la présence de produit chimique et l'élément d'ouvrage en béton. L'influence de l'ensoleillement, de la concentra-

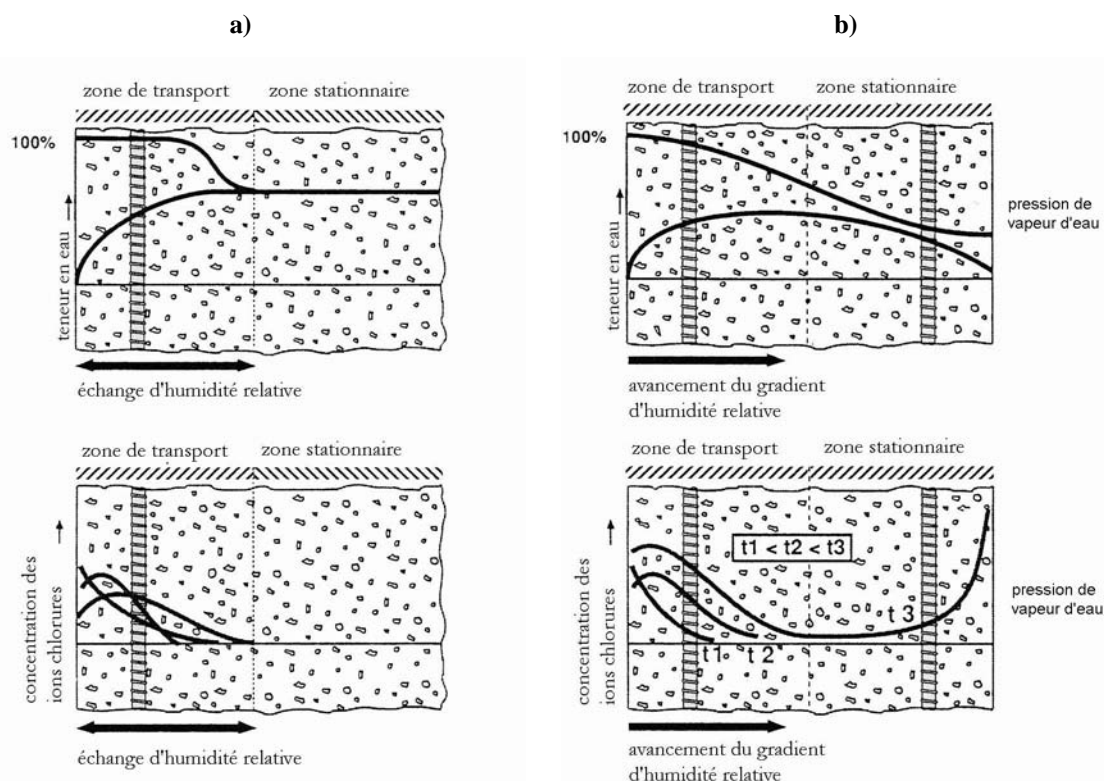


FIGURE 3.29: Profils spatiaux d'humidité relative et de la concentration des ions chlorures en fonction de l'action de l'humidité relative à l'interface air et béton [Flueckiger93].

tion en gaz carbonique du lieu géographique (température, humidité relative de l'air et précipitations) permet de tenir compte du microclimat. Les zones ombrées sont différenciées des zones ensoleillées directement exposées au soleil (§ 2.4.1). Les zones urbaines, industrielles et de campagne représentent des lieux avec différentes concentrations de gaz carbonique (§ A.1.5). Les simulations sont entreprises pour différentes régions de Suisse, soit dans les Alpes avec les stations météorologiques de Guetsch et du Grand-Saint-Bernard, dans les régions des Préalpes, du Jura et des Grisons avec la station météorologique de Davos, dans la région du Tessin avec les stations météorologiques de Lugano et Locarno-Monti, sur le Plateau suisse avec la station météorologique de Zürich-Kloten, dans la région de l'arc lémanique avec la station météorologique de Pully et finalement dans la plaine du Rhône avec la station météorologique de Sion (§ 2.1) (Tableau 3.9).

Paramètres	Variation des paramètres
ensoleillement	zone ombrée, zone ensoleillée
gaz carbonique	zone urbaine, zone de campagne, zone industrielle
type d'épandage	épandage mécanique, épandage automatique
exposition	zone d'éclaboussures, zone d'eau stagnante, zone de brouillard, sous une dalle de roulement, zone au-dessus d'un plan d'eau
perméabilité du béton	béton A, béton B, béton C, avec imprégnation hydrophobe
lieu géographique	Davos, Locarno-Monti, Zurich, Lugano, Grand-Saint-Bernard, Pully, Guetsch, Sion
enrobage	15mm, 30mm, 40mm

TABLEAU 3.9: Paramètres étudiés avec les résultats de simulations déterministes.

La concentration de produits chimiques évolue dans le temps selon les interventions d'épandage de produits de déverglage et selon les conditions météorologiques locales, appelées précédemment lieu géographique (§ 2.4.3). La concentration d'ions chlorures dépend essentiellement du type d'interventions d'épandage de produits de déverglage, soit les épandages mécaniques sous forme de solide ou

de saumure ou les épandages automatiques de saumure assistés par un monitoring d'un tronçon de route (§ 2.2.1) (Tableau 3.9).

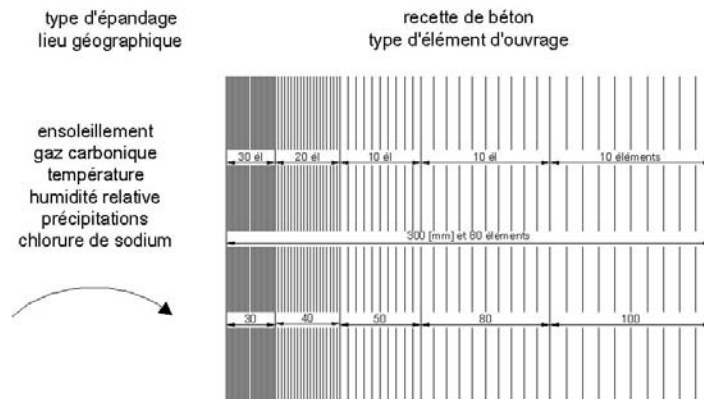


FIGURE 3.30: Élément d'ouvrage en béton modélisé avec le modèle TransChlor par la méthode des éléments finis, discrétisation du maillage.

La position de l'élément face au trafic, appelée également exposition, la perméabilité du béton et la position de l'armature dans le béton d'enrobage constituent les caractéristiques propres de l'ouvrage. Les zones d'exposition à l'eau stagnante, aux éclaboussures, au brouillard, protégée des intempéries au-dessus d'un plan d'eau et sous une dalle de roulement de pont sont les différents emplacements étudiés sur un ouvrage (§ A.3 et § 2.2). Notons que les expositions sous une dalle de roulement et au-dessus d'un plan d'eau représente une exposition au brouillard avec des fluctuations de l'humidité relative et de la température de l'air légèrement différente. Différentes perméabilités du matériau sont produites grâce à des recettes de béton différentes, soit une faible perméabilité avec le béton de perméabilité A, une perméabilité moyenne avec une recette de béton B et une grande perméabilité avec un béton de perméabilité C (§ 3.2). L'impact de l'épaisseur d'enrobage des aciers d'armature est étudié dans l'évaluation de l'influence des différents paramètres précités pour une profondeur de 30 millimètres (§ 3.3.1 à § 3.3.6). Dans la prédiction de l'initiation de la corrosion par l'approche déterministe (§ 3.3.6) et probabiliste (§ 4.4), trois différentes profondeurs sont étudiées soit 15, 30 et 40 millimètres (Tableau 3.9).

Dans l'étude de l'influence des différents paramètres introduits précédemment, les simulations des différents modes de transport avec le modèle TransChlor sont exécutées sur une période de 25 ans pour les éléments d'ouvrage exposés aux éclaboussures et de 50 ans pour les éléments d'ouvrage exposés au brouillard (§ 3.3.1 à § 3.3.6).

### 3.3.1 Influence de l'ensoleillement

La température intervient dans les équations du transfert thermique (§ 3.1.2), dans l'isotherme d'adsorption (§ 3.1.4.1) et de désorption (§ 3.1.4.2), dans le coefficient de capillarité de l'eau liquide (§ 3.1.5) et dans le coefficient de diffusion des ions chlorures dans l'eau (§ 3.1.6.1). Par absence de données dans la littérature, l'effet de la température n'est pas pris en considération sur le coefficient de vapeur d'eau (§ 3.1.4).

L'exposition de l'ouvrage à l'ensoleillement a pour effet d'augmenter sensiblement la température dans le béton d'enrobage par rapport aux zones ombrées (Figure 3.31 a). L'humidité relative dans les pores du béton est légèrement accentuée dans les zones ensoleillées, due à un transfert plus rapide avec une augmentation de la température (Figure 3.31 b). L'évolution de la teneur en eau dans les pores du béton montre des différences plus importantes (Figure 3.31 c). La répercussion de l'ensoleillement sur la concentration des ions chlorures reste cependant modeste. En effet, les pics supplémentaires observés dans les zones ensoleillées n'apportent pas une différence marquée par rapport aux zones ombrées (Figure 3.31 d).

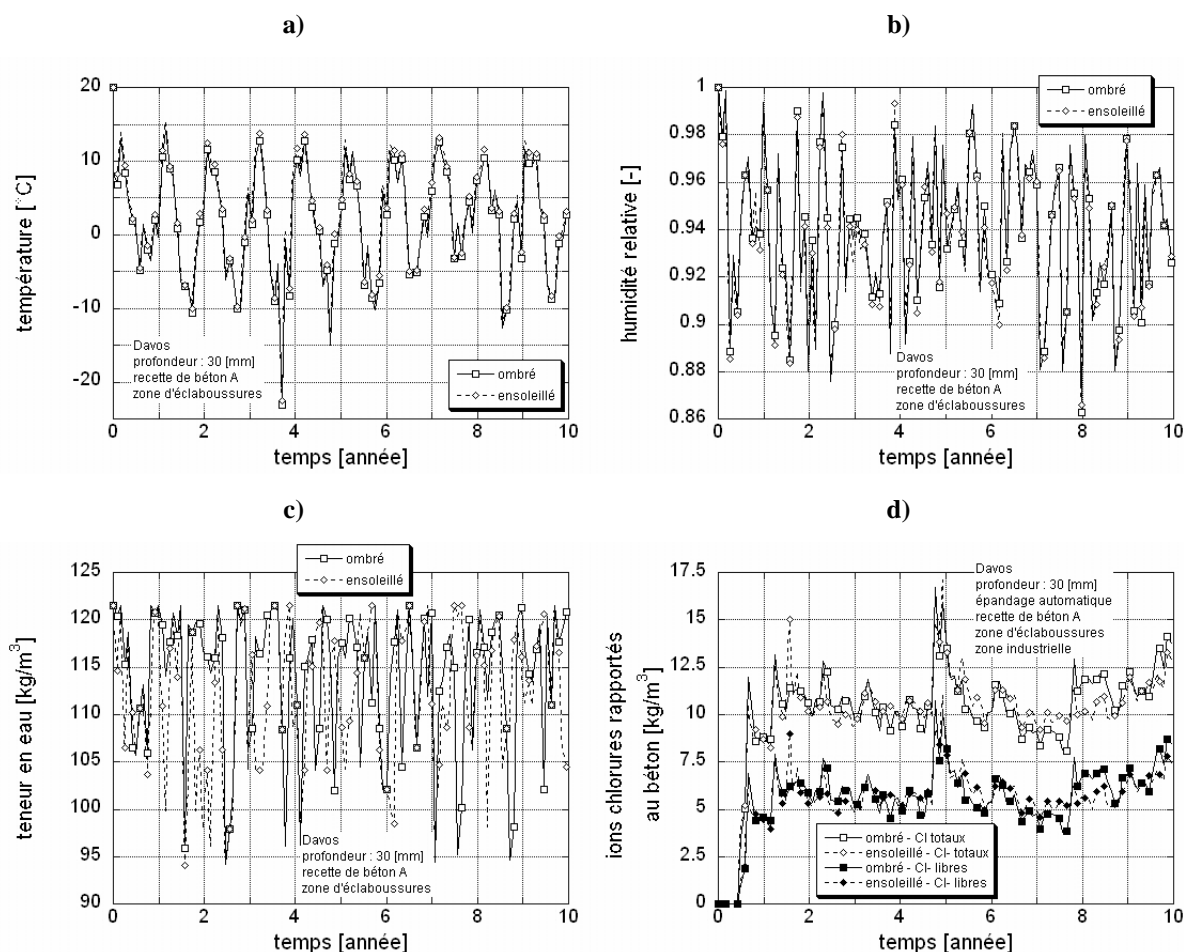


FIGURE 3.31: Effets de l'ensoleillement sur les différents modes de transport, simulé avec TransChlor.

### 3.3.2 Influence de la concentration en gaz carbonique dans l'air

Le transfert et la présence du gaz carbonique dans le béton d'enrobage produisent la carbonatation du béton (§ 3.1.3) et influence la capacité d'adsorption des ions chlorures par la pâte de ciment (§ 3.1.6).

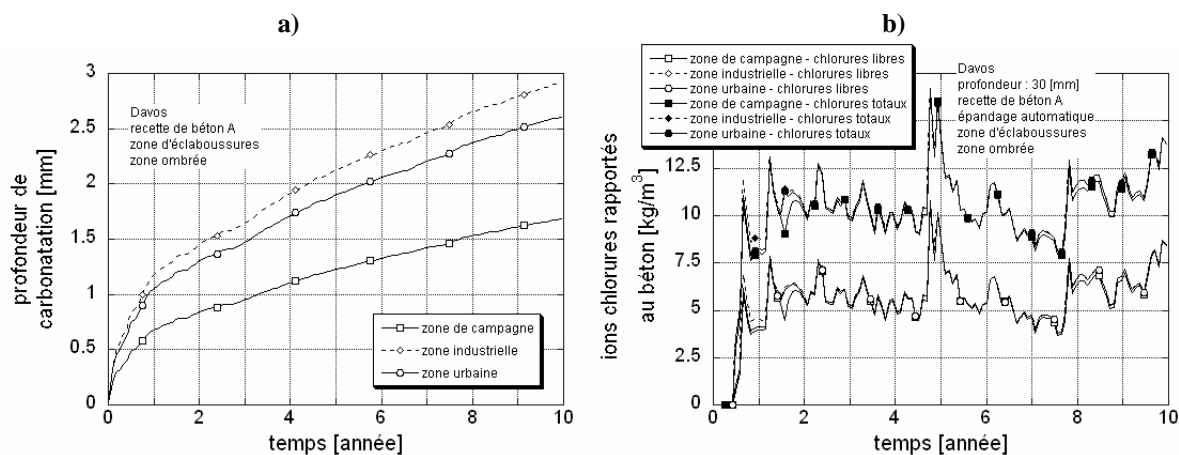


FIGURE 3.32: Influence de la concentration en gaz carbonique, simulés avec TransChlor, sur a) l'évolution de la carbonatation, b) la concentration en ions chlorures.

La vitesse de carbonatation est plus rapide lorsque la concentration en gaz carbonique est plus importante. Néanmoins, la réponse n'est pas linéaire par rapport au taux de concentration de gaz carbo-

nique dans l'air (Figure 3.32 a). La répercussion de la concentration de gaz carbonique sur le transport des ions chlorures reste modeste, car les courbes d'évolution des ions chlorures se superposent (Figure 3.32 b).

### 3.3.3 Influence du type d'épandage

Les quantités de produits de déverglaçage déversés sur la chaussée dépendent du type d'épandage effectué. Ces quantités dépendent de la sévérité hivernale d'une région (§ 2.2.1), soit, dans le cas de Davos, 1497 et 1213 [g/m<sup>2</sup>.an] pour respectivement un épandage mécanique et automatique.

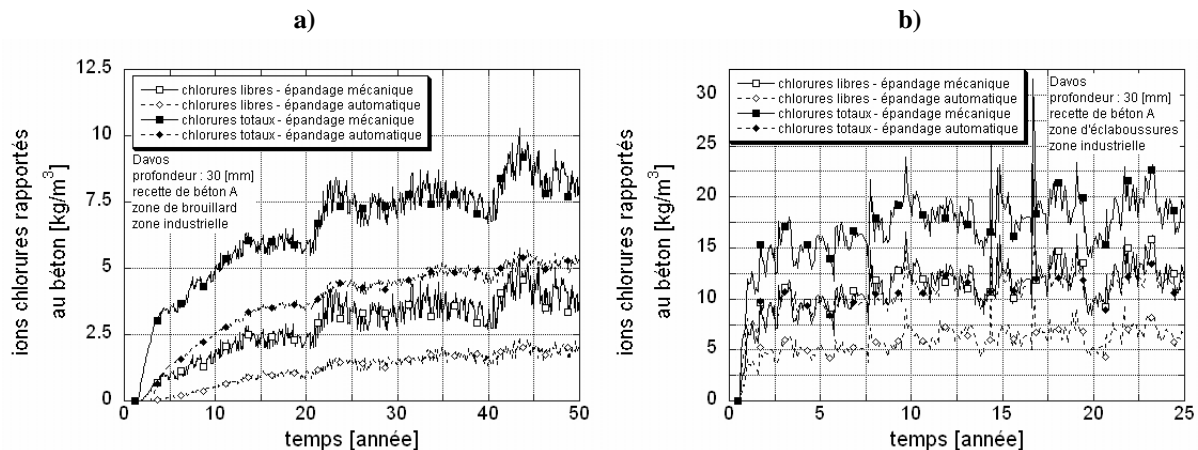


FIGURE 3.33: Influence du type d'épandage sur la concentration des ions chlorures, simulés avec TransChlor a) exposition au brouillard, b) exposition aux éclaboussures.

L'évolution des ions chlorures dans le béton est plus lente pour le cas d'épandage automatique. Après une cinquantaine d'année, elle représente environ le 45% de la concentration des ions chlorures effectuée avec des moyens mécaniques. Il faut ainsi un plus grand nombre d'années pour atteindre une concentration similaire aux zones avec un épandage mécanique (Figure 3.33 a et b).

### 3.3.4 Influence de l'exposition de l'élément d'ouvrage

Les données météorologiques de température et d'humidité relative sont atténuées dans les zones d'exposition protégées des intempéries au-dessus d'un plan d'eau et sous une dalle de roulement de pont par rapport aux zones de brouillard (§ 2.3.2). Par contre, dans les zones d'exposition d'eau stagnante et d'éclaboussures, la présence d'eau liquide est prise en considération. Cette durée est plus importante pour l'exposition à l'eau stagnante (§ A.3).

L'évolution des températures dans le béton d'enrobage sont semblables pour les zones d'exposition à l'eau stagnante, aux éclaboussures et au brouillard. La zone d'exposition au-dessus d'un plan d'eau comporte des températures légèrement plus douces que ces derniers. Finalement, la température dans les caissons subit des gradients de température moins rapides que les autres expositions (Figure 3.34 a).

Le développement de la carbonatation est favorisé dans les zones d'exposition au brouillard qui contient l'humidité optimale pour un développement rapide de la carbonatation. La saturation plus importante des pores diminue la vitesse de carbonatation pour les zones d'exposition à l'eau stagnante et aux éclaboussures. Un taux de remplissage trop faible diminue également la vitesse de carbonatation telle, dans les zones d'exposition au-dessus d'un plan d'eau et sous une dalle de roulement (Figure 3.34 b).

Le taux de remplissage d'eau des pores peut se visualiser à travers l'évolution temporelle de l'humidité relative dans les pores. Les zones d'eau stagnante et d'éclaboussures ont une évolution de l'humidité relative très proche. Les trois autres zones ont également une évolution de l'humidité relative, semblable entre elles avec toutefois beaucoup moins de fluctuation et une tendance à s'équilibrer aux alentours de 80% d'humidité relative (Figure 3.34 c).

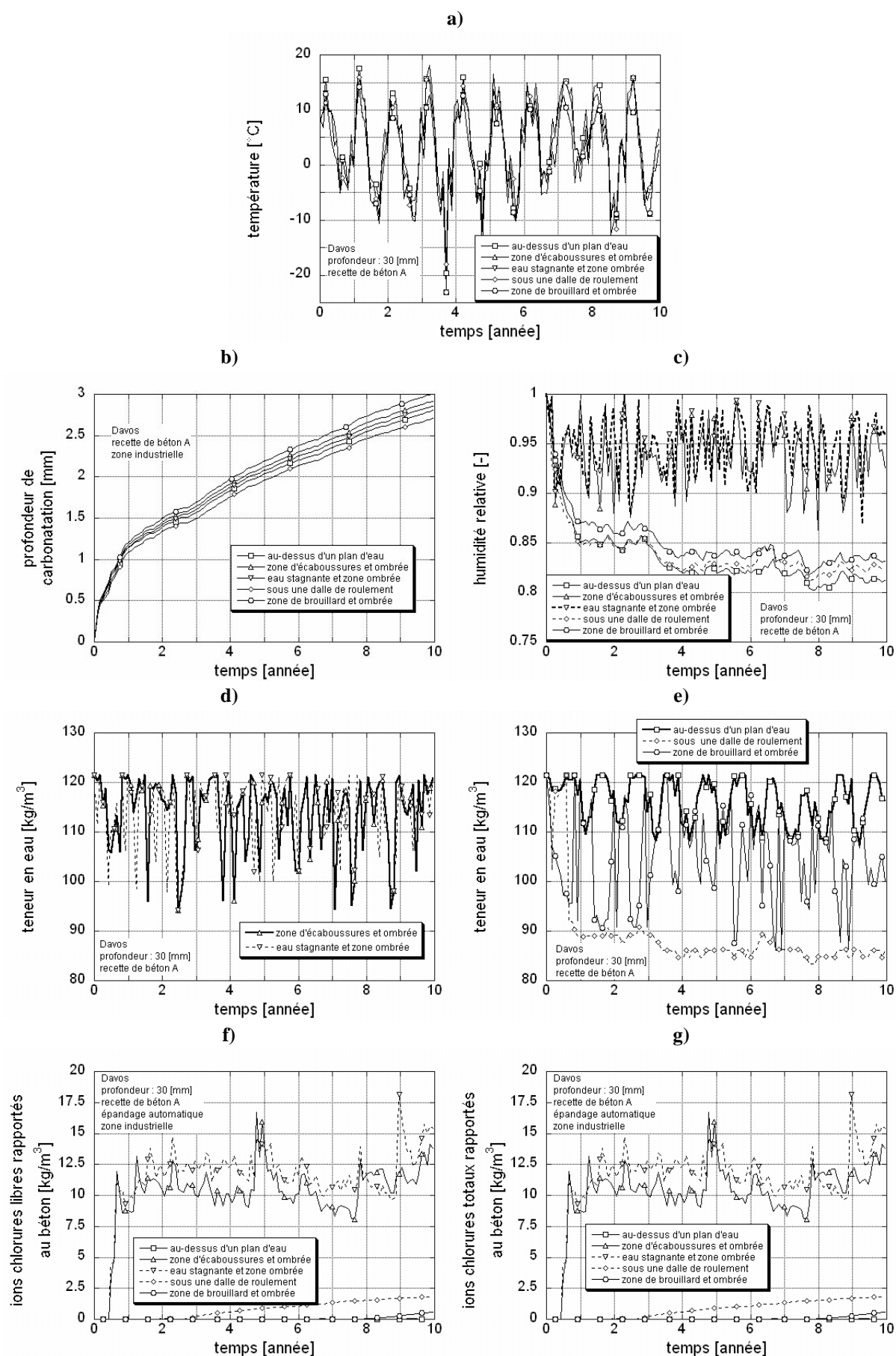


FIGURE 3.34: Influence de l'exposition de l'ouvrage sur les différents modes de transport, simulés avec TransChlor.

L'évolution de la teneur en eau est identique à l'humidité relative, sauf pour la zone d'exposition au-dessus d'un plan d'eau. Dans ce cas de figure, la teneur en eau est plus importante que la zone d'exposition au brouillard. Ceci provient du fait que l'atténuation de la température diminue également les fluctuations de la teneur en eau. Ce cas ne se produit évidemment pas lors d'exposition au brouillard comprenant de grandes fluctuations (Figure 3.34 d et e).

L'évolution des ions chlorures dans le béton d'enrobage est sans équivoque très importante dans les zones d'exposition avec de l'eau liquide, comme l'exposition à l'eau stagnante et aux éclaboussures. L'évolution dans ces deux zones est plus ou moins identique. Dans les trois autres zones, l'évolution des ions chlorures est beaucoup plus lente et la concentration des ions chlorures s'élève à environ 10% de la concentration des zones exposées à l'eau liquide après 10 ans (Figure 3.34 f et g).

Dans le cas de l'exposition à l'eau liquide, telle l'exposition aux éclaboussures, la concentration des ions chlorures libres ne varie plus comme dans un processus de diffusion. Ici, le béton d'enrobage sert simplement de transit aux ions chlorures. A une profondeur plus ou moins fixe selon la perméabilité du béton, il se produit une accumulation des ions chlorures (Figure 3.35).

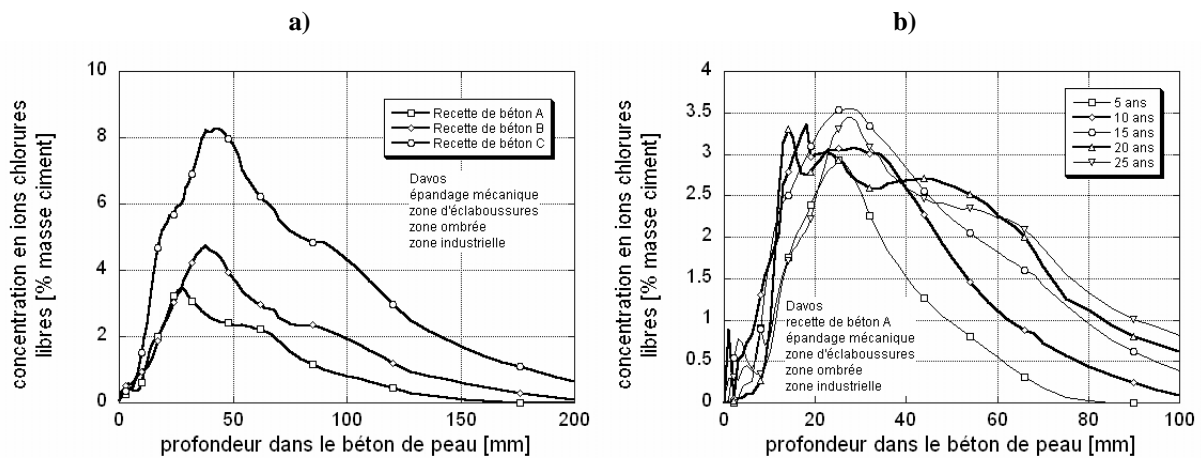


FIGURE 3.35: Variation spatiale de la concentration en ions chlorures libres a) en fonction de la perméabilité du béton, b) en fonction de la durée d'exposition.

### 3.3.5 Influence de la perméabilité du béton

La perméabilité du matériau est directement liée à la recette du béton lors de sa confection (§ 3.2.1). Pour tous les modes de transport, sauf pour le transfert thermique, les mouvements de corps étrangers sont directement reliés à la perméabilité. Ainsi un béton moins perméable accueillera moins rapidement un corps étranger comme démontré dans le cas du béton de perméabilité A, suivi du cas du béton de perméabilité B avec une perméabilité moyenne et finalement du cas du béton de perméabilité C (Figure 3.36 c à k).

La perméabilité du béton, sa composition, son taux de remplissage des pores par l'eau n'influencent pas le transfert thermique. Le taux de remplissage des pores est mis en évidence avec la visualisation de l'évolution de la température selon deux zones d'exposition différentes (Figure 3.36 a et b).

La perméabilité du matériau est moins visible sur l'évolution de la teneur en eau, car le volume des pores est différent entre les trois recettes de béton (Figure 3.36 e et f).

La profondeur de carbonatation est réduite de deux tiers pour le béton de perméabilité A et de la moitié pour le béton de perméabilité B par rapport à le béton de perméabilité C (Figure 3.36 g).

L'évolution de la concentration d'ions chlorures est légèrement inférieure pour le béton de perméabilité B et inférieure d'environ 20% pour le béton de perméabilité A par rapport au béton de perméabilité C (Figure 3.36 h à k). Dans la zone d'exposition aux éclaboussures, le béton de perméabilité B comporte des concentrations d'ions chlorures proche du zéro après 6 à 8 ans. Ces valeurs sont dues à un déplacement rapide vers le coeur du béton des ions chlorures durant la période estivale avec des précipitations (Figure 3.36 i et k).

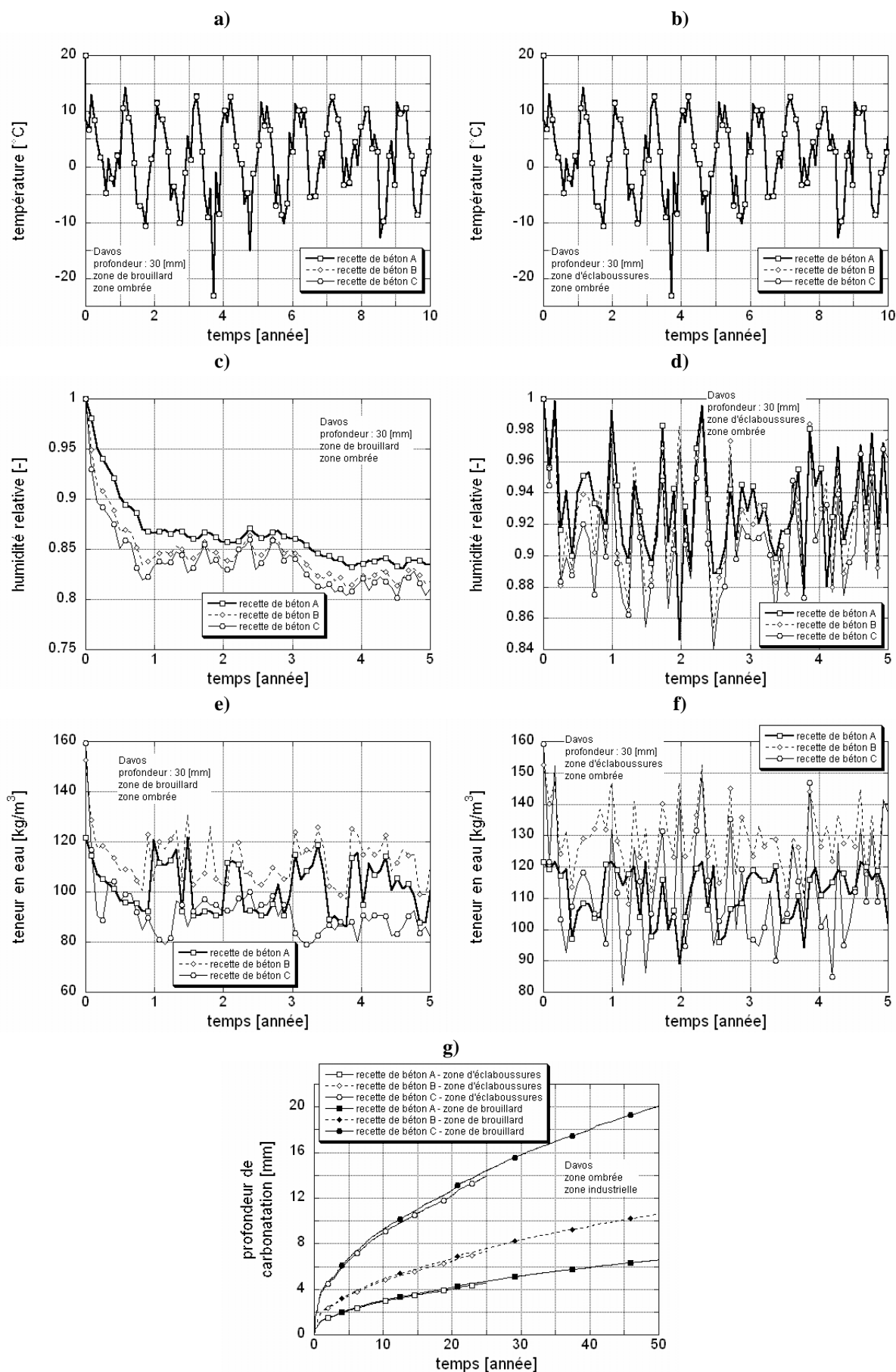


FIGURE 3.36: Influence de la perméabilité du matériau sur les différents modes de transport, simulés avec TransChlor.



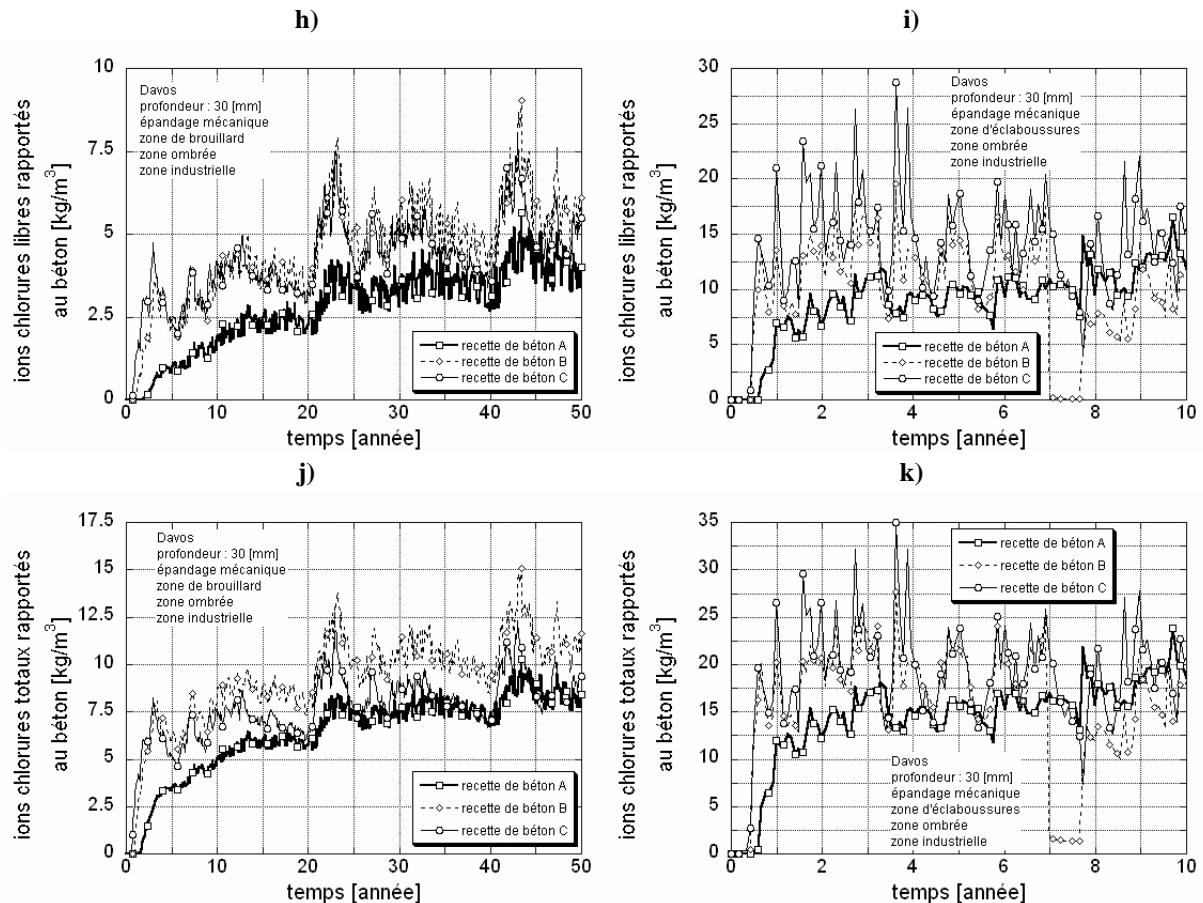


FIGURE 3.36: Influence de la perméabilité du matériau sur les différents modes de transport, simulés avec TransChlor.

L'imprégnation hydrophobe réduit la vitesse de pénétration d'eau sous forme de capillarité et se situe proche d'une simulation avec une exposition au brouillard. Aussi, les résultats des simulations de l'exposition au brouillard conviennent pour un béton traité avec une imprégnation hydrophobe.

### 3.3.6 Influence du lieu géographique

La température varie selon la hauteur l'altitude du lieu (§ A.1.1). Ainsi, les températures les plus basses sont enregistrées dans les Alpes et dans le canton des Grisons et les températures les plus douces dans le canton du Tessin (Figure 3.37 a).

Pour une exposition au brouillard, les conditions d'humidité relative de l'air se répercutent sur l'évolution de l'humidité relative dans les pores du béton. La région du Plateau suisse est la plus humide, elle est suivie de la région des Alpes et des Préalpes. Les régions les plus sèches sont représentées par les régions du Tessin et de la vallée du Rhône (Figure 3.37 b).

Pour une exposition aux éclaboussures, l'évolution de l'humidité relative dans les pores du béton met en évidence l'apport des précipitations dans une région. Les faibles teneurs en humidité relative se trouvent sur la région de l'arc lémanique et de la vallée du Rhône. Des fluctuations importantes, accompagnées d'un taux d'humidité relative plus importante, se situent au niveau des Alpes et dans la région du Tessin (Figure 3.37 c).

Le niveau d'humidité du canton du Tessin favorise à un développement rapide de la carbonatation. Pour la région de la vallée du Rhône, la rapidité du phénomène se situe proche de celle du Tessin, en restant toutefois inférieure. L'arc lémanique, les Alpes et les Préalpes ont des propagations de carbonatation similaires. Ces propagations restent toutefois inférieures aux régions précitées auparavant. Le développement le moins rapide de la carbonatation se situe dans la région du plateau suisse, où l'humidité relative de l'air plus importante ralentit la vitesse de carbonatation du béton (Figure 3.37 d et e).

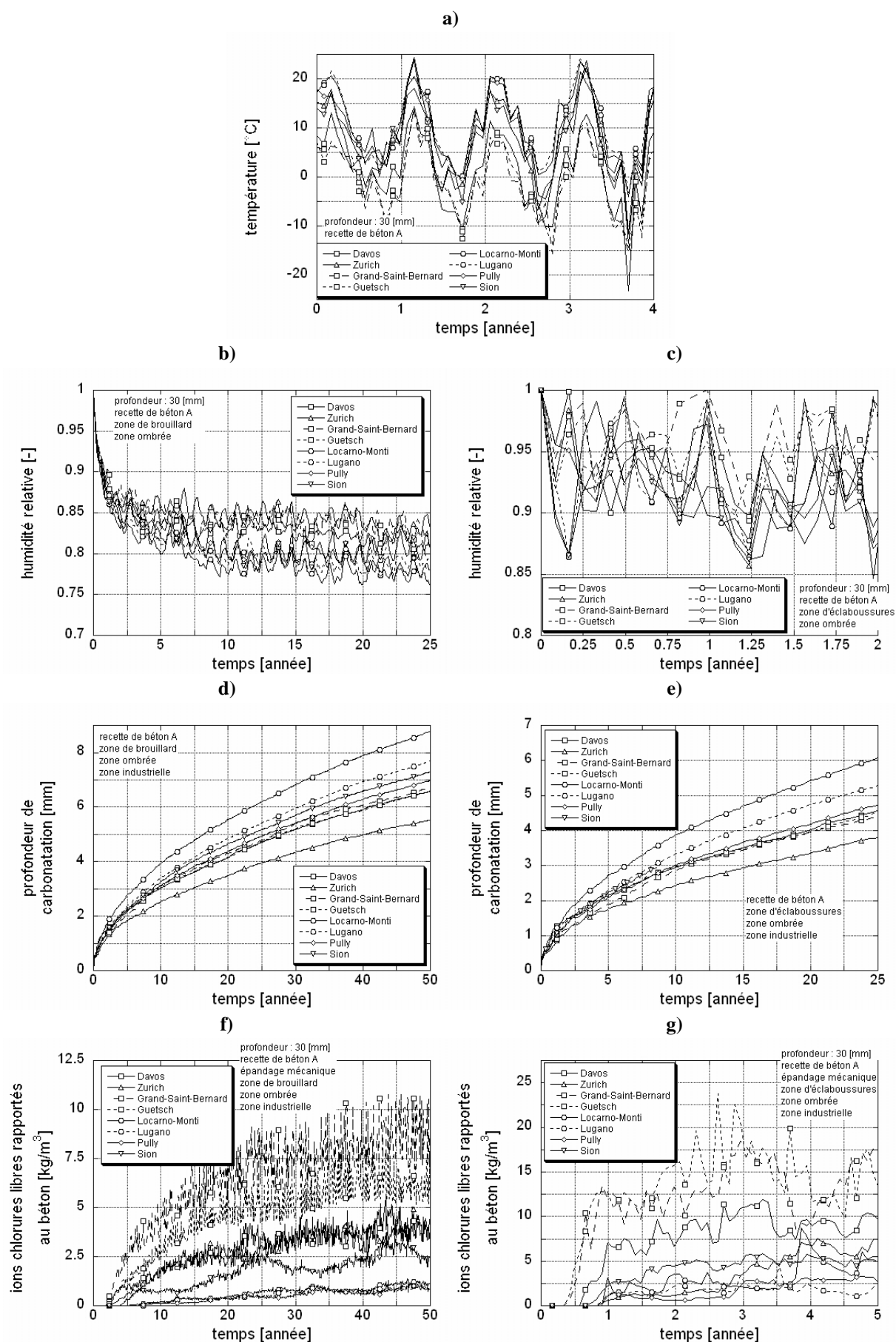


FIGURE 3.37: Influence de la région en Suisse sur les différents modes de transport, simulés avec TransChlor.

Pour les zones d'exposition au brouillard, les ions chlorures se déplacent plus rapidement dans la région des Alpes. Les régions des Préalpes et du Plateau suisse ont une évolution similaires, mais restent toutefois inférieures à la région des Alpes, elles sont suivies de la région de la plaine du Rhône. Finalement, la région lémanique et le Tessin ont une évolution des ions chlorures similaires, mais beaucoup plus faible que les autres régions (Figure 3.37 f).

Pour les zones d'exposition aux éclaboussures, les Alpes respectivement les Préalpes sont les zones d'évolution des ions chlorures les plus rapides. L'évolution, lente au stade initiale, présente une évolution progressive et constante sur le Plateau suisse après 5 ans, ce qui présente l'évolution la plus rapide après les Alpes et les Préalpes. Pour les autres régions, l'évolution reste similaire avec des fluctuations et des réductions de concentrations d'ions chlorures à des périodes différentes. Ces régions sont représentées comme l'évolution la plus lente des ions chlorures dans le béton d'enrobage (Figure 3.37 g).

### 3.4 Conclusions

6. *Le modèle de transport TransChlor est développé par une approche numérique, utilisant la méthode des éléments finis et des différences finies. Il combine entre eux différents modes de transport, soit le transfert thermique, le transfert hydrique de vapeur d'eau et d'eau liquide par succion capillaire, la diffusion du gaz carbonique, la diffusion ionique des chlorures et l'entraînement des ions chlorures par le mouvement hydrique.*
7. *La modélisation du mouvement d'eau liquide par succion capillaire est développée à travers les équations de la cinématique. Cette dernière est transformée en mouvement des ions chlorures, simulant l'entraînement des ions chlorures par l'eau, par un algorithme particuliers.*
8. *Les résultats expérimentaux mettent en exergue les coefficients de capillarité, paramètre du modèle TransChlor, en fonction de la perméabilité du béton (rapport massique de l'eau sur le ciment) et de la température (jusqu'à  $-10^{\circ}\text{C}$ ).*
9. *Il y a une relation direct entre le coefficient de capillarité et la valeur du coefficient de perméabilité à l'air mesurée in-situ avec la méthode Torrent, essai non destructif.*
10. *Les simulations avec le modèle TransChlor montre qu'il suffit de quelques heures à un front d'ions chlorures avec une concentration de 3% de chlorure de sodium dans l'eau pour parcourir vingt millimètres dans le béton d'enrobage. Ce résultat est validé avec les résultats expérimentaux, provenant d'un capteur à fibres optiques, développé dans un travail de recherche en parallèle.*
11. *Les essais montrent que la succion capillaire est négligeable dans les bétons ayant subi un traitement avec une imprégnation hydrophobe. Ainsi, un élément de béton exposé à l'eau liquide peut être traité comme un béton conventionnel avec une exposition au brouillard.*
12. *Les évolutions spatiales et temporelles de la concentration des ions chlorures dépendent avant tout du type d'exposition, en présence d'eau liquide ou de vapeur d'eau. En présence d'eau liquide, les ions chlorures transitent dans les 30 à 60 premiers millimètres du béton d'enrobage. Une accumulation d'ions chlorures se produit au bout de cette zone et les ions chlorures continuent moins rapidement leur transition vers le coeur du béton (Figure 3.38). En présence de vapeur d'eau, le processus de diffusion de l'eau et des ions chlorures provoque un transfert et une accumulation progressifs et lents dans le béton d'enrobage (Figure 3.38).*
13. *La répercussion de la concentration de gaz carbonique sur le transport d'ions chlorures reste modeste, ceci a été démontré par simulation avec le modèle TransChlor.*

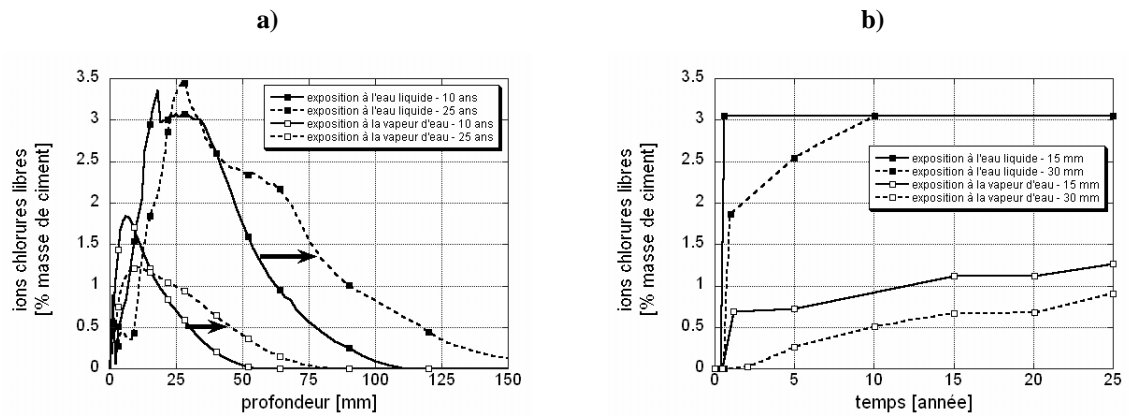


FIGURE 3.38: Principe de transfert des ions chlorures dans le béton d'enrobage en fonction de l'exposition, a) évolution spatiale, b) évolution temporelle.

## 4 Probabilité d'initiation de la corrosion dans les ouvrages

*L'approche probabiliste permet l'évaluation de la probabilité d'initiation de la corrosion d'un élément d'ouvrage. Avec l'approche probabiliste, les simulations numériques sont mises en évidence à travers la variabilité de plusieurs paramètres, à savoir les paramètres de transport, l'épaisseur d'enrobage et la teneur critique en ions chlorures. Pour effectuer l'évaluation de la probabilité d'initiation de la corrosion, un dénominateur commun est défini entre la sollicitation et la résistance, soit la concentration en ions chlorures au niveau de l'acier d'armature. La variabilité de l'épaisseur d'enrobage permet de rapporter une simulation se situant à un point discret de l'élément d'ouvrage à l'ensemble de l'élément d'ouvrage.*

*Ce chapitre se propose de donner les définitions de la probabilité d'initiation de la corrosion comprenant des précisions sur les sollicitations et les résistances. La méthode de Rosenblueth est utilisée à travers le modèle TransChlor afin d'obtenir une solution probabiliste des sollicitations. La variabilité de l'épaisseur d'enrobage est également insérée dans la solution des sollicitations par une méthode de moyenne pondérée. Des simulations avec le modèle TransChlor sont exécutées et les résultats des simulations sont analysés. Finalement, la probabilité d'initiation de la corrosion est discutée à travers les notions de risque et des suggestions de dimensionnement concluent ce chapitre.*

### 4.1 Approche probabiliste

Cette section est retranscrite d'une annexe d'un rapport effectué dans le cadre d'un travail postgrade de «Risque et sécurité des systèmes techniques» [Conciatori02a].

L'évaluation de la probabilité d'initiation de la corrosion s'effectue en comparant la sollicitation (S) à la résistance à la corrosion du matériau (R). Cette équation est appelée fonction limite (EQ. 4.1) [Spiegel81] [Gehlen99] [Perrimann02].

$$R - S \geq 0 \quad (\text{EQ 4.1})$$

R            résistance à la corrosion du matériau,

S            sollicitation par les ions chlorures au niveau de l'acier d'armature.

La probabilité d'initiation de la corrosion ( $P_f$ ) utilise la propriété du produit de convolution. C'est-à-dire la sommation sur l'étendue des valeurs de S, des probabilités que S est égale à x et que R est inférieure à x. La somme des probabilités peut être calculée en utilisant la loi de multiplication des probabilités, en admettant que R et S sont indépendants statistiquement (EQ. 4.2) [Bailey99] [Spiegel81] [Kraker82] [Lindvall01].

$$P_f = P[S > R] = \sum P[S = x] \cdot P[R < x] \quad (\text{EQ 4.2})$$

$P_f$             probabilité d'initiation de la corrosion,

x            point considéré sur R et S.

Le but de l'intégration est de trouver le volume de la région de l'initiation afin de déterminer la probabilité d'initiation de la corrosion (EQ. 4.3 et Figure 4.1 a).

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} (f_S(x) \cdot F_R(x)) dx \quad (\text{EQ 4.3})$$

$f_S$             fonction probabiliste continue, représentant la sollicitation,

$F_R$  fonction probabiliste continue cumulée, représentant la résistance.

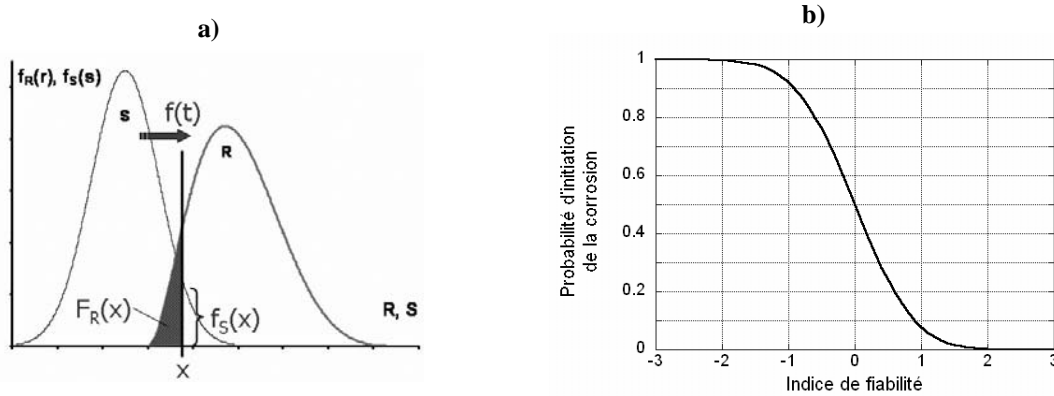


FIGURE 4.1: a) Probabilité d'initiation de la corrosion avec représentation probabiliste de la sollicitation et de la résistance, b) Relation entre l'indice de fiabilité et la probabilité d'initiation de la corrosion.

L'intégration du produit de convolution peut être résolue avec la méthode de Simpson (EQ. 4.4). En faisant l'hypothèse que les lois probabilistes continues utilisées pour la sollicitation et pour la résistance suivent des lois probabilistes lognormales, la borne de l'intégration inférieure (EQ. 4.3) vaut zéro (EQ. 4.4).

$$P_f = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{x_{i+1} - x_i}{6} \cdot \left[ f_S(x_i) \cdot F_R(x_i) + 4 \cdot f_S\left(\frac{x_{i+1} + x_i}{2}\right) \cdot F_R\left(\frac{x_{i+1} + x_i}{2}\right) + f_S(x_{i+1}) \cdot F_R(x_{i+1}) \right] \quad (EQ. 4.4)$$

$i$  indice de position de la variable  $x$ .

L'intervalle entre  $x_i$  et  $x_{i+1}$  est choisi de manière à minimiser l'erreur due à l'approximation faite avec la méthode de Simpson (approximation avec une courbe suivant une fonction du polynôme du second degré). De plus, l'intégrale étant bornée avec plus infini, l'approximation par Simpson impose un nombre fini de sommation. Aussi, une analyse de convergence est effectuée dans le programme de la résolution de l'intégration par la méthode de Simpson avec un critère fixant l'erreur admise  $\varepsilon$  qui peut être établi avec l'équation (EQ. 4.5).

$$\varepsilon \leq \frac{x_{i+1} - x_i}{6} \cdot \left[ f_S(x_i) \cdot F_R(x_i) + 4 \cdot f_S\left(\frac{x_{i+1} + x_i}{2}\right) \cdot F_R\left(\frac{x_{i+1} + x_i}{2}\right) + f_S(x_{i+1}) \cdot F_R(x_{i+1}) \right] \quad (EQ. 4.5)$$

$\varepsilon$  erreur admise avec l'intégration de Simpson.

La région d'initiation, par rapport à la densité de probabilité combinée de  $R$  et  $S$ , peut être illustrée en trois dimensions. La pointe de dimensionnement est la pointe d'initiation la plus probable. La sécurité par rapport à une fonction limite peut être représentée par l'indice de fiabilité  $\beta$ , qui représente la distance entre la pointe de dimensionnement et la pointe  $[\mu_S, \mu_R]$  (Figure 4.2) [Bailey99] [Lindvall01].

Si les lois probabilistes de  $R$  et  $S$  sont des lois normales, et si elles ne sont pas corrélées, l'indice de fiabilité peut prendre la forme simplifiée suivante (EQ. 4.6) (dans ce travail de recherche, les lois probabilistes ne sont pas des lois normales) [Roelfstra00] [Bruehwiler04].

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (EQ. 4.6)$$

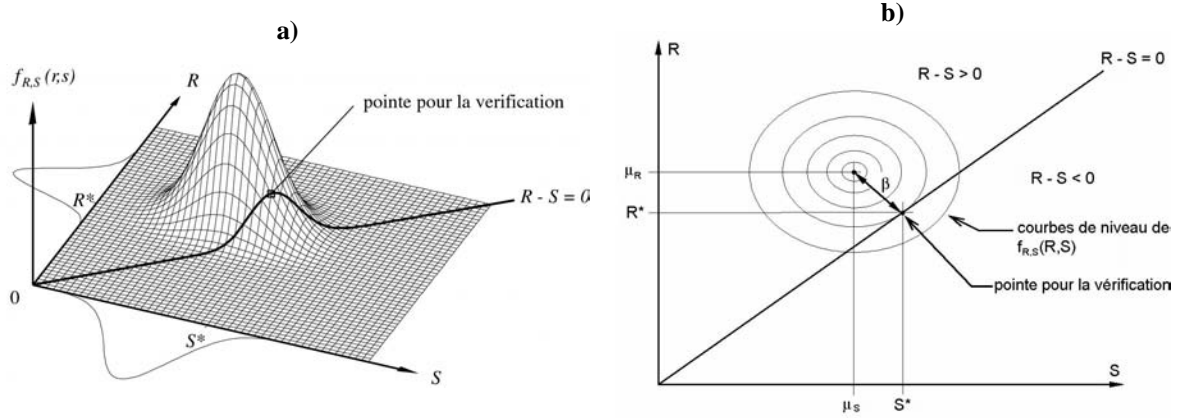


FIGURE 4.2: a) Région d'initiation par rapport à la densité de probabilité combinée à la résistance et à la sollicitation [Bailey99], b) Mise en évidence de l'indice de fiabilité [Bailey99].

Lors d'utilisation de lois probabilistes autres que normales, le lien de l'indice de fiabilité avec la probabilité d'initiation de la corrosion, peut se faire à l'aide de la fonction erf suivante (EQ. 4.7, EQ. 4.8 et Figure 4.1 b).

$$P_f = \frac{1}{2} - \left( \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^{\beta} e^{-s^2} ds \right) = \frac{1}{2} \cdot (1 + \text{erf}(-\beta)) \quad \text{si} \quad \beta < 0 \quad (\text{EQ 4.7})$$

$$P_f = \frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^{\beta} e^{-s^2} ds = \frac{1}{2} \cdot (1 - \text{erf}(\beta)) \quad \text{si} \quad \beta \geq 0 \quad (\text{EQ 4.8})$$

s variable d'une fonction exponentielle.

L'approximation de la fonction erf peut être effectuée avec les équations (EQ. 4.9). Cependant ces équations approximatives possèdent une erreur importante à l'origine de la courbe cumulée lognormale, c'est-à-dire pour des valeurs de x proche de 0. En-dehors de cette zone, la fonction erf est une approximation ayant une erreur maximale de  $1,5 \cdot 10^{-7}$  (EQ. 4.9) [Abramowitz72].

$$\text{erf}(x) = 1 - [(a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3 + a_4 \cdot t^4 + a_5 \cdot t^5) \cdot e^{-x^2}] \quad \text{avec} \quad t = \frac{1}{1 + p \cdot x} \quad (\text{EQ 4.9})$$

$a_1$  paramètre d'approximation de la fonction erf (0.254829592),

$a_2$  paramètre d'approximation de la fonction erf (-0.284496736),

$a_3$  paramètre d'approximation de la fonction erf (1.421413741),

$a_4$  paramètre d'approximation de la fonction erf (-1.453152027),

$a_5$  paramètre d'approximation de la fonction erf (1.061405429),

p paramètre d'approximation de la fonction erf (0.3275911),

x variable.

Dans ce travail de recherche, les distributions probabilistes continues utilisées sont essentiellement les lois probabilistes normales et lognormales. Le poids de ces fonctions est mis en équation ci-après pour respectivement la loi probabiliste normale (EQ. 4.10) et lognormale (EQ. 4.11).

$$f_N(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\left(\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right)} \quad (\text{EQ 4.10})$$

$$f_L(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \xi \cdot x}} \cdot e^{-\left(\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\ln(x) - \lambda}{\xi}\right)^2\right)} \quad (EQ 4.11)$$

- $f_N$  poids de la fonction probabiliste normale,  
 $f_L$  poids de la fonction probabiliste lognormale,  
 $\mu$  paramètre de la loi probabiliste normale, appelé moyenne,  
 $\sigma$  paramètre de la loi probabiliste normale, appelé écart-type,  
 $\lambda$  paramètre de la loi probabiliste lognormale,  
 $\xi$  paramètre de la loi probabiliste lognormale.

Le poids cumulée des fonctions probabilistes continues normales (EQ. 4.12), respectivement lognormales (EQ. 4.13) sont également mis en équation ci-après [Conciatori02a].

$$F_N(x) = \int_{-\infty}^x \left( \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma}} \cdot e^{-\left(\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right)^2\right)} \right) dt = \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x - \mu}{\sqrt{2} \cdot \sigma}\right) \right] \quad (EQ 4.12)$$

$$F_L(x) = \int_0^x \left( \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \xi \cdot t}} \cdot e^{-\left(\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\ln(t) - \lambda}{\xi}\right)^2\right)} \right) dt = \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\ln(x) - \lambda}{\sqrt{2} \cdot \xi}\right) \right] \quad (EQ 4.13)$$

Pour comparer la résistance et la sollicitation, un dénominateur commun représenté par des unités similaires doit être trouvé. Dans ce travail de recherche, le dénominateur choisi est la concentration d'ions chlorures au droit de l'acier d'armature.

## 4.2 Sollicitations

Les sollicitations sont représentées par la concentration des ions chlorures au niveau de l'acier d'armature. Ainsi, les paramètres probabilistes peuvent être très nombreux.

- Lieu géographique : humidité relative de l'air, précipitations pluviales, précipitations nivales, température de l'air, radiation solaire, concentration en gaz carbonique et concentration en ions chlorures.
- Propriétés du béton d'enrobage : hétérogénéité et quantité des composants du béton, propriétés calorifiques de chaque composant du béton, propriétés d'adsorption de la vapeur d'eau, propriétés d'adsorption de l'eau liquide, propriétés d'adsorption du gaz carbonique, propriétés de réaction du gaz carbonique avec la pâte de ciment, propriétés de diffusion des ions chlorures dans l'eau, propriétés de transport des ions chlorures par l'eau et propriétés d'adsorption des ions chlorures par la pâte de ciment.
- Position des aciers d'armature dans le béton d'enrobage.

La fissuration n'est pas prise en considération dans ce travail de recherche et ne fait donc pas partie des propriétés du béton d'enrobage.

Devant ce large éventail de paramètres, il est important de classer les paramètres en différents niveaux de variabilité. Les paramètres du lieu géographique, représentant les conditions de bord du modèle TransChlor, sont les sources de variabilité les plus importantes et les plus difficiles à évaluer. Ces variabilités sont prises en considération dans le découpage d'une structure en éléments d'ouvrage à microclimat et à exposition aux ions chlorures identiques (§ A.3.5).



L'insertion d'une approche probabiliste dans un modèle non linéaire complexe présente des difficultés dans la formulation des équations. Aussi, il faut limiter le nombre de paramètres probabilistes à insérer dans le modèle. Les coefficients de diffusion hydrique des chlorures et de capillarité influencent de manière directe le mouvement hydrique et ionique dans le béton d'enrobage. Le transfert thermique n'a pas été inséré dans l'approche probabiliste, car la rapidité du transfert thermique dans le béton permet d'utiliser une approche déterministe. Ainsi, les paramètres probabilistes insérés dans le modèle TransChlor sont listés ci-après, soit le

- coefficient de diffusion de la vapeur d'eau,
- coefficient de capillarité de l'eau liquide,
- coefficient de diffusion des ions chlorures dans l'eau,
- épaisseur de l'enrobage des aciers d'armature.

Par la suite, pour des raisons de simplification, la valeur de chacun des paramètres des lois probabilistes est discutée avec la moyenne et l'écart-type, paramètres de la loi probabiliste normale. Cependant, la loi probabiliste lognormale est mieux adaptée pour les coefficients de transport (Figure 4.3 a), car leurs variabilités sont semblables aux essais de perméabilité à l'air Torrent (§ 3.2.3.1). Pour l'épaisseur d'enrobage, la loi probabiliste normale est la plus adaptée, car la variabilité est équivalente de part et d'autre de la moyenne (Figure 4.3 b). Les paramètres de la loi probabiliste normale peuvent être convertis en paramètres pour la loi probabiliste lognormale (EQ. 4.14 et EQ. 4.15).

$$\lambda = \ln \left( \frac{\mu^2}{\sqrt{\mu^2 + \sigma^2}} \right) \quad (EQ. 4.14)$$

$$\xi = \sqrt{\ln \left( \frac{\sigma^2}{\mu^2} + 1 \right)} \quad (EQ. 4.15)$$

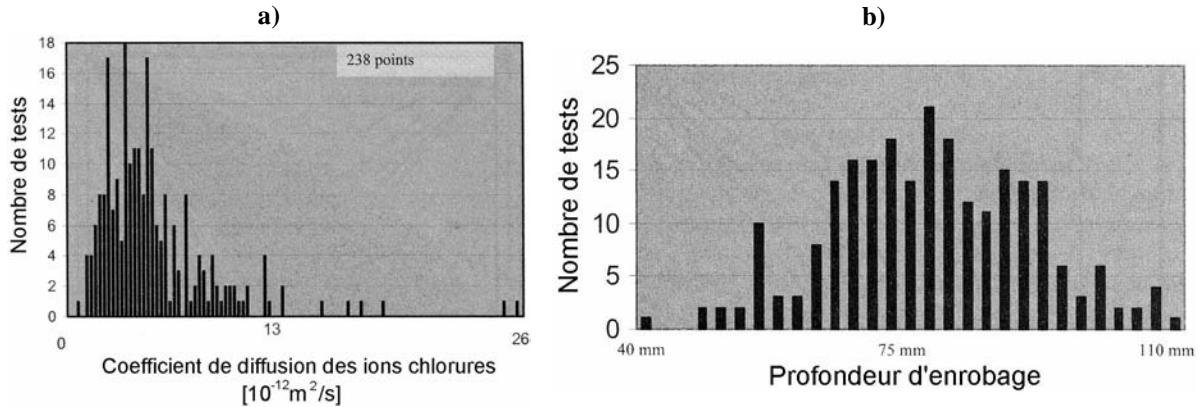


FIGURE 4.3: Exemple de variabilité provenant de mesures sur des ponts en Pennsylvanie [Tikalsky05], a) Variation du coefficient de diffusion des ions chlorures dans l'eau, b) Variation de l'épaisseur d'enrobage des aciers d'armature.

#### Coefficient de diffusion de la vapeur d'eau

La variabilité du coefficient de diffusion de la vapeur d'eau (§ 3.2.3.3) peut être prise en considération en utilisant le coefficient de variation (cov) (EQ. 4.16). Cette variabilité est obtenue par le séchage à différents niveaux hydriques de 70 éprouvettes pour chaque perméabilité du béton.

$$\text{cov} = \frac{\sigma}{\mu} \quad (EQ. 4.16)$$

cov coefficient de variation.

Les résultats du calcul du coefficient de variation présentent également une variabilité. La moyenne de ces variabilités suffit pour prendre en considération une variation du coefficient de diffusion de la vapeur d'eau (Tableau 4.1). Le coefficient de variation introduit dans le modèle TransChlor correspond à la valeur de 0.736. Notre choix s'est porté sur cette valeur car les coefficients de diffusion de la vapeur d'eau coïncident avec les valeurs de la littérature (§ A.5.5.2) pour le modèle de Bazant utilisant les paramètres suivant, soit  $n = 4$ ,  $h_c = 0.85$  et  $\alpha = 0.005$ .

Type de béton	Paramètre du modèle de Bazant $n=4$ , $h_c=0.75$ et $\alpha=0.05$			Paramètre du modèle de Bazant $n=4$ , $h_c=0.85$ et $\alpha=0.005$		
	Moyenne [ $10^{-5} \text{ mm}^2/\text{s}$ ]	Ecart-type [ $10^{-5} \text{ mm}^2/\text{s}$ ]	cov	Moyenne [ $10^{-5} \text{ mm}^2/\text{s}$ ]	Ecart-type [ $10^{-5} \text{ mm}^2/\text{s}$ ]	cov
Béton A	5.316	7.762	1.460	31.64	23.63	0.7468
Béton B	4.693	3.169	0.6753	29.76	21.421	0.7198
Béton C	4.904	2.998	0.6113	32.65	24.201	0.7412
<b>Moyenne</b>			<b>0.916</b>			<b>0.736</b>

TABLEAU 4.1: Calcul du coefficient de variation sur les coefficients de diffusion de vapeur d'eau.

### Coefficient de capillarité de l'eau liquide

La variabilité de ce coefficient ne dépend ni de la température, ni de la perméabilité du béton. Elle est prise en considération par un écart-type moyen fixe.

- $\sigma = 5.962 \cdot 10^{-5} \text{ mm/s}$ ,
- $\sigma = 1.322 \cdot 10^{-4} \text{ mm/s}$  pour une recette de béton avec une imprégnation hydrophobe.

Les résultats proviennent d'essais en laboratoire sur 180 éprouvettes et 9 éprouvettes pour les bétons traités avec une imprégnation hydrophobe (§ 3.2.3.5) (confectionnées dans les deux cas avec les trois bétons de perméabilité A, B et C). La faible quantité d'éprouvettes confectionnées avec une imprégnation hydrophobe explique la variabilité plus importante des résultats de mesure.

### Coefficient de diffusion des ions chlorures dans l'eau

Moult auteurs avancent des lois probabilistes sur les coefficients de diffusion d'ions chlorures dans l'eau provenant soit de mesures sur les ouvrages (Figure 4.4 a), d'hypothèses ou d'expériences (Figure 4.4 b).

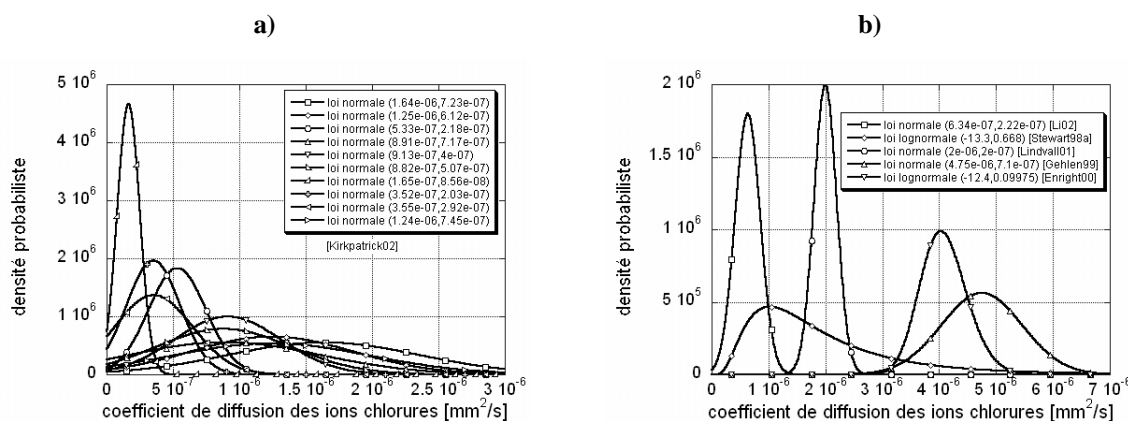


FIGURE 4.4: Densité probabiliste des coefficients de diffusion des ions chlorures dans l'eau, a) sur différents ouvrages [Kirkpatrick02] [Kirkpatrick02a], b) proposée par différents chercheurs.

A partir de l'étude de la littérature (§ 3.1.6.1), une loi exponentielle est proposée en fonction du rapport massique de l'eau sur le ciment. A nouveau, l'écart-type a été choisie comme une constante pour tous les rapports massiques de l'eau sur le ciment.

- $\sigma = 5.772 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$ .

En comparant aux valeurs provenant de la littérature (Figure 4.4), cet écart-type est environ dix fois plus important, ce qui représente un écart considérable. Ce choix d'écart-type élevé exerce peu d'influences sur les résultats des simulations (§ 4.4.1).

### Epaisseur d'enrobage des aciers d'armature

L'épaisseur d'enrobage des aciers d'armature dépend du savoir faire des constructeurs et ingénieurs, des normes en vigueur et du mode d'exécution de la mise en place des aciers d'armature. La variabilité reste, par contre, du même ordre de grandeur, soit un écart-type d'environ 10 millimètres (Figure 4.5).

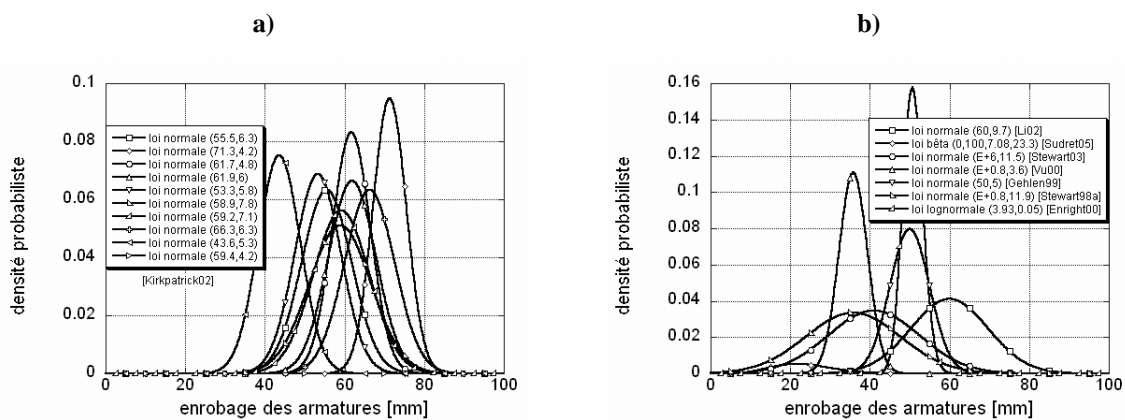


FIGURE 4.5: Densité probabiliste des épaisseurs d'enrobage des aciers d'armature, a) sur différents ouvrages [Kirkpatrick02] [Kirkpatrick02a], b) proposée par différents auteurs, E : épaisseur d'enrobage variable.

Par défaut, le modèle TransChlor propose une valeur de l'écart-type de 23 millimètres. Cette valeur provient d'une investigation sur un ouvrage. Les aciers sont mis à nus par piquage et l'épaisseur d'enrobage est mesurée à l'aide d'un double mètre [Brühwiler04]. Cette grande variabilité de l'enrobage correspond aux ouvrages construits avant l'apparition de valeurs normatives et de disposition constructive adéquate (taquets, paniers de support). Bien qu'il n'y ait peu de valeurs en littérature, la variabilité de l'épaisseur d'enrobage se situe aujourd'hui entre 5 et 10 millimètres.

Le choix de la variabilité de l'épaisseur d'enrobage doit permettre de relier une simulation se situant à un point discret de l'élément d'ouvrage à l'élément d'ouvrage dans son ensemble.

#### 4.2.1 Méthode de Rosenblueth

La méthode de Rosenblueth [Rosenblueth81] permet d'insérer une approche probabiliste dans un modèle non linéaire complexe. Elle s'approche de la méthode de Monte-Carlo avec la différence que des points particuliers sur les paramètres probabilistes sont choisis et non issus d'un choix aléatoire. Ceci induit un nombre fini de simulations, par rapport à la méthode de Monte-Carlo où la solution s'améliore avec une grande quantité de simulations.

##### 4.2.1.1 Paramètres probabilistes

Les distributions probabilistes continues, couramment utilisées dans la pratique, sont les distributions normales, lognormales, binomiales, etc. La méthode de Rosenblueth transforme une distribution

probabiliste continue en une distribution discrète en deux points (Figure 4.6), de manière à ce que les trois premiers moments probabilistes soient égaux [Cauwelaert85] (EQ. 4.17, EQ. 4.18 et EQ. 4.19).

- moment du premier ordre      moyenne       $E[x] = \mu_x$       (EQ 4.17)
  - moment du deuxième ordre      variance       $\text{var}[x] = (s_x)^2$       (EQ 4.18)
  - moment du troisième ordre      coefficient de dissymétrie de Pearson [Pearson79]       $\gamma \cdot (s_x)^3$       (EQ 4.19)
- $E[x]$       moyenne pondérée d'un échantillon  $x$ ,  
 $\text{var}[x]$       variance d'un échantillon  $x$ ,  
 $s$       paramètre de la loi normale, représentant l'écart-type,  
 $x$       échantillon,  
 $\gamma$       coefficient de dissymétrie de Pearson.

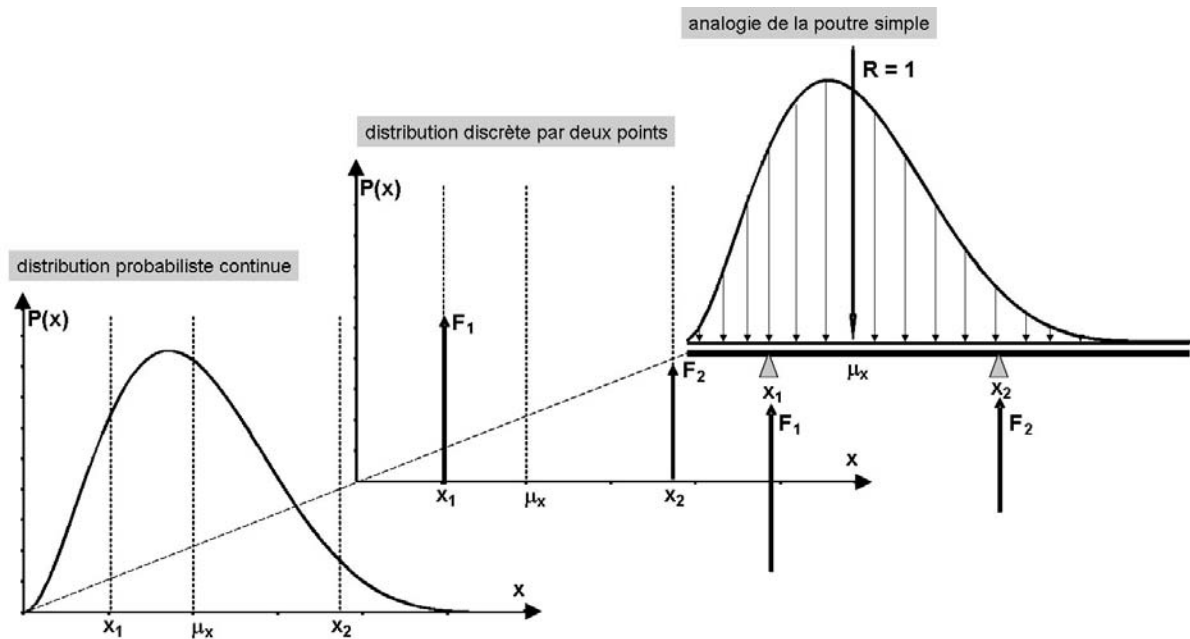


FIGURE 4.6: Transformation d'une distribution probabiliste continue en distribution discrète.

Cette dernière définition peut, par analogie, utiliser les équations d'une poutre simple [Haldi98]. La charge est représentée par la distribution probabiliste et sa résultante  $R$  agit sur la position  $\mu_x$ , son intensité valant un. Les réactions d'appui sont représentées par la distribution discrète des deux poids  $F_1$  et  $F_2$  et leur position se situe sur les points  $x_1$  et  $x_2$  (Figure 4.6). Pour une loi probabiliste dissymétrique, le coefficient de Pearson influence le poids  $F_2$  (EQ. 4.20). L'équilibre des charges verticales permet d'obtenir le poids complémentaire  $F_1$  (EQ. 4.21). L'équilibre des moments de rotation aux points  $x_1$  et  $x_2$  permet de définir la position  $x_2$  (EQ. 4.22), respectivement la position  $x_1$  (EQ. 4.23).

$$F_2 = \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\gamma}{|\gamma|} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{1 + (\gamma/2)^2}} \right) \right] \quad (\text{EQ 4.20})$$

$$F_1 = 1 - F_2 \quad (EQ 4.21)$$

$$x_2 = \mu_x + \left( s_x \cdot \sqrt{\frac{F_1}{F_2}} \right) \quad (EQ 4.22)$$

$$x_1 = \mu_x - \left( s_x \cdot \sqrt{\frac{F_2}{F_1}} \right) \quad (EQ 4.23)$$

F poids de la transformation d'une loi probabiliste continue en distribution discrète,

1,2 position de la distance x ou du poids F.

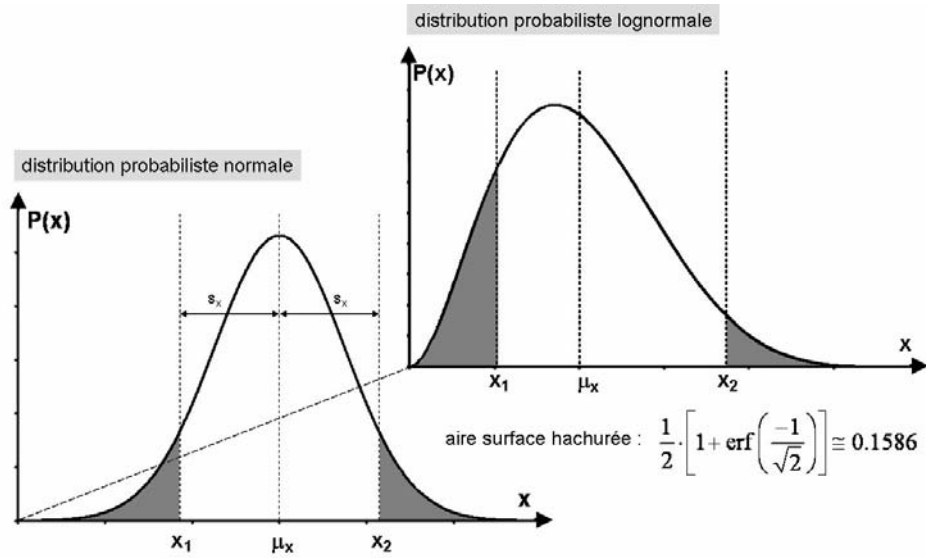


FIGURE 4.7: Position de  $x_1$  et  $x_2$ .

Le coefficient de dissymétrie de Pearson  $\gamma$  est nul lorsque la distribution probabiliste continue est symétrique (EQ. 4.24). Dans ce cas particulier, les poids  $F_1$  et  $F_2$  sont identiques et prennent la valeur de 0.5 (EQ. 4.25).

$$F_2 = \lim_{\gamma \rightarrow 0} \left\{ \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{\gamma}{|\gamma|} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{1 + (\gamma/2)^2}} \right) \right] \right\} = \frac{1}{2} \quad (EQ 4.24)$$

$$F_1 = 1 - F_2 = F_2 = \frac{1}{2} \quad (EQ 4.25)$$

Les deux points particuliers  $x_1$  et  $x_2$  de la distribution probabiliste continue normale, représentés par la moyenne plus ou moins un écart type, prennent les valeurs des équations (EQ. 4.26 et EQ. 4.27) pour la cumulée de cette distribution. Ces deux équations permettent d'obtenir les positions  $x_1$  et  $x_2$  pour toutes les autres distributions probabilistes continues (Figure 4.7).

$$P(x_1) = \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{-1}{\sqrt{2}}\right) \right] \approx 0.1586 \quad (EQ 4.26)$$

$$P(x_2) = \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 + \operatorname{erf}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \right] \cong 0.8434 \quad (EQ 4.27)$$

$P(x_i)$  pourcentage du nombre de fois que  $x$  survient par rapport au nombre total de l'échantillon.

Ainsi, les poids ( $F_1, F_2$ ) et les positions ( $x_1, x_2$ ) se calculent pour toutes les fonctions probabilistes continues et notamment pour les fonctions probabilistes continues normales et lognormales (Tableau 4.2).

Distribution	Position		Poids		Définition de variables
	$x_1$	$x_2$	$F_1$	$F_2$	
<b>normale <math>f(\mu, s)</math></b>	$\mu + s$	$\mu - s$	0.5	0.5	$sm = e^{\lambda} \cdot (1 - e^{-\xi})$
<b>lognormale <math>f(\lambda, \xi)</math></b>	$e^{\lambda - \xi}$	$e^{\lambda + \xi}$	$\frac{sp}{sp + sm}$	$\frac{sm}{sp + sm}$	$sp = e^{\lambda} \cdot (e^{\xi} - 1)$

TABLEAU 4.2: Positions et poids pour une distribution normale et lognormale,  $sm$  et  $sp$  : variables intermédiaires pour le calcul des poids de la loi probabiliste lognormale.

#### 4.2.1.2 Combinaison de plusieurs paramètres probabilistes

Plusieurs paramètres modélisés par une distribution probabiliste peuvent s'insérer dans un modèle numérique. Le modèle de Rosenbluth insère dans le modèle numérique, en  $2^n$  simulations, toutes les combinaisons possibles des positions ( $x_{1,i}, x_{2,i}$ ) de  $n$  paramètres d'input.

Avant d'explicitier cette méthode, quelques précisions sur la terminologie utilisée sont introduites ci-après.

$x_{ji}$  : paramètre d'input du modèle numérique (§ 4.2.1.1),

$j$  : numéro de la position des paramètres d'input, associé au poids  $F_j$  (§ 4.2.1.1),

$i$  : numéro du paramètre d'input,

$n$  : nombre de paramètres d'input,

$k$  : numéro de la simulation avec le modèle numérique,

$l$  : nombre total de simulations avec le modèle numérique,

$y_k$  : paramètre résultat d'output du modèle numérique,

$F$  : poids de la transformation d'une loi probabiliste continue en distribution discrète,

$Q$  : poids associé pour plusieurs paramètres modélisés par une distribution probabiliste.

Pour une simulation,  $n$  paramètres probabilistes  $x_{ji}$  sont introduits dans le modèle numérique considérant soit  $j=1$ , soit  $j=2$ . Le résultat obtenu avec ce premier choix de paramètre est  $y_k$ , avec  $k$  valant un pour la première simulation. D'autres simulations sont nécessaires afin d'épuiser toutes les combinaisons possibles de  $x_{ji}$ , pour des valeurs de  $j$  valant soit  $j=1$ , soit  $j=2$  (Tableau 4.3, cas pour  $n = 2$ ).

Chaque résultat  $y_k$  possède un poids associé  $Q_k$ . Ce poids associé s'obtient par le produit des poids  $F_{ji}$  correspondant au paramètre  $x_{ji}$  introduit dans la simulation courante (Tableau 4.3). La somme de tous les poids associés prend la valeur de 1 (EQ. 4.29), comme pour la somme des poids pour un para-

$x_{ji}$	$k$	$y_k$	$Q_k$
$x_{11}$	<b>1</b>	$y_1$	$Q_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{12} \end{bmatrix} = F_{11} \cdot F_{12}$
$x_{12}$	<b>SIMULATION NUMERIQUE</b>		
$x_{11}$		$y_2$	$Q_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{22} \end{bmatrix} = F_{11} \cdot F_{22}$
$x_{22}$			
$x_{21}$		$y_3$	$Q_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{21} \\ F_{12} \end{bmatrix} = F_{21} \cdot F_{12}$
$x_{12}$			
$x_{21}$	<b>4</b>	$y_4$	$Q_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{21} \\ F_{22} \end{bmatrix} = F_{21} \cdot F_{22}$
$x_{22}$			

TABLEAU 4.3: Simulation et combinaison des paramètres (cas pour 2 paramètres modélisées par une loi probabiliste).

mètre (EQ. 4.28 ou EQ. 4.21). Finalement, le nombre de simulations (représenté par la variable  $l$ ) du modèle numérique est également connu et est relié au nombre de paramètre d'input (EQ. 4.30).

$$\sum_{j=1}^n F_{ji} = 1 \quad (EQ\ 4.28)$$

$$\sum_{k=1}^l Q_k = 1 \quad (EQ\ 4.29)$$

$$l = 2^n \quad (EQ\ 4.30)$$

#### 4.2.1.3 Résultats des simulations numériques

Les résultats des simulations sont recombinaés afin d'obtenir les premiers moments d'une fonction probabiliste. L'espérance de degré  $t$  (EQ. 4.31), la moyenne (EQ. 4.32), la variance (EQ. 4.33) et le troisième moment (EQ. 4.34) sont formulés pour le cas général de  $n$  variables d'input. Les premiers moments ne fournissent pas l'information sur l'allure de la distribution probabiliste continue.

$$E(y^t) = \sum_{k=1}^l Q_k \cdot (y_k)^t \quad (EQ\ 4.31)$$

$$\mu_y = \sum_{k=1}^1 Q_k \cdot y_k \quad (EQ\ 4.32)$$

$$(s_y)^2 = \sum_{k=1}^1 Q_k \cdot (y_k - \mu_y)^2 \quad (EQ\ 4.33)$$

$$\gamma \cdot (s_y)^3 = \sum_{k=1}^1 Q_k \cdot (y_k - \mu_y)^3 \quad (EQ\ 4.34)$$

t exposant, nombre entier positif.

Avec la méthode du maximum de vraisemblance [Ross96] [Ang84] [Ang75], une distribution probabiliste continue peut être constituée (Tableau 4.4) à partir des résultats des simulations. Le choix de la distribution probabiliste reste une hypothèse majeure de ce modèle probabiliste. Par exemple, le choix d'une distribution normale implique que le troisième moment est nul ou que la fonction probabiliste est une fonction symétrique. Le choix, par contre, d'une distribution lognormale court-circuite tous les résultats de valeurs négatives. Cette deuxième loi probabiliste a été choisie pour le modèle TransChlor car les concentrations en ions chlorures ne sont jamais négatives.

Distribution	Paramètres des distributions probabilistes	
<b>normale</b> $f(\mu, s)$	$\mu_y = \frac{1}{1} \cdot \sum_{k=1}^1 y_k$	$(s_y)^2 = \frac{1}{1} \cdot \sum_{k=1}^1 (y_k - \mu_y)^2$
<b>lognormale</b> $f(\lambda, \xi)$	$\lambda_y = \sum_{k=1}^1 Q_k \cdot \ln(y_k)$	$\xi_y = \sum_{k=1}^1 Q_k \cdot (\ln(y_k) - \lambda_y)^2$

TABLEAU 4.4: Paramètres des distributions probabilistes par reconstitution.

#### 4.2.2 Variabilité de l'enrobage

L'évolution du transport ionique dans le béton est focalisée sur la zone de détérioration. En l'occurrence dans le béton armé, la zone de détérioration se trouve à l'interface entre les aciers d'armature et le béton d'enrobage. La variabilité de la position dans l'espace de ces aciers peut également être modélisée par une distribution probabiliste.

Cette variabilité peut être prise en considération en appliquant la formule de Bayes. La concentration en ions chlorures  $y$  est combinée avec la variabilité de la position des aciers d'armature  $e$ . La formulation de Bayes ci-après est donnée pour des valeurs discrètes (EQ. 4.35).

$$P(y \cdot e) = P(y|e) \cdot P(e) \quad (EQ\ 4.35)$$

$e$  épaisseur d'enrobage des aciers d'armature.

Par analogie à la formulation discrète, les paramètres d'une loi probabiliste continue peuvent également être insérés dans la formulation de Bayes. On obtient, en intégrant sur tout le domaine spatial, la concentration en ions ( $y$ ) par la position des aciers d'armature ( $e$ ). Les variables probabilistes ( $\mu_y, s_y, \lambda_y$



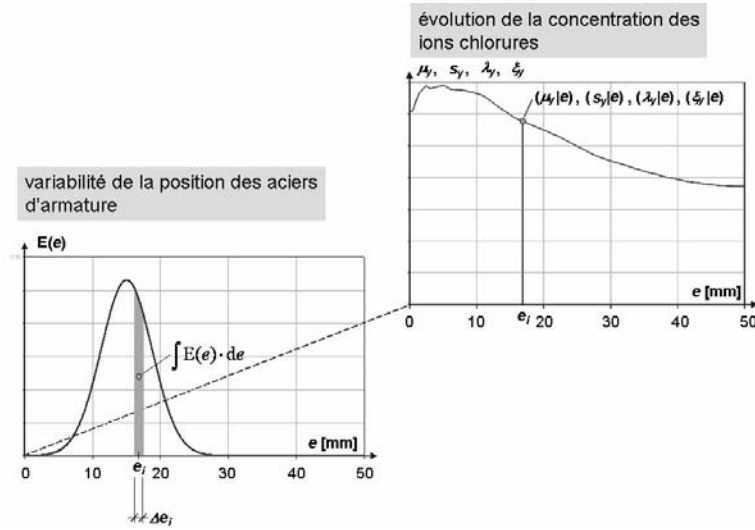


FIGURE 4.8: Schéma de la prise en considération de l'enrobage des aciers d'armature.

et  $\xi_y$ ), considérées constantes, peuvent être extraites de l'intégration. Le résultat obtenu correspond à une moyenne pondérée sur le domaine spatial (EQ. 4.36 à EQ. 4.39).

$$P(\mu_y \cdot e) = E(\mu_y|e) \cdot \int (E(e) \cdot de) \quad (EQ. 4.36)$$

$$P(s_y \cdot e) = E(s_y|e) \cdot \int (E(e) \cdot de) \quad (EQ. 4.37)$$

$$P(\lambda_y \cdot e) = E(\lambda_y|e) \cdot \int (E(e) \cdot de) \quad (EQ. 4.38)$$

$$P(\xi_y \cdot e) = E(\xi_y|e) \cdot \int (E(e) \cdot de) \quad (EQ. 4.39)$$

Le produit entre la variabilité de l'évolution de la concentration des ions chlorures et la variabilité de la position des aciers d'armature (EQ. 4.36 à EQ. 4.39) s'obtient en multipliant une portion de surface délimitée par  $\Delta e_i$  et par la valeur probabiliste de  $E(e)$  au point  $e_i$ . Les moyennes  $(\mu_y|e)$  ou  $(s_y|e)$  ou  $(\lambda_y|e)$  ou  $(\xi_y|e)$  s'obtiennent en sommant ce produit sur tout le domaine ( $e$ ) (Figure 4.8).

Les domaines pour une loi probabiliste normale et lognormale diffèrent. Le domaine de la loi normale vaut  $]-\infty, \infty[$  et le domaine de la loi lognormale vaut  $[0, \infty[$ . Si la loi probabiliste des résultats choisis est lognormale et que la variabilité de la position des aciers d'armature est une loi normale, la surface du domaine manquant peut être moyennée et répartie sur le reste du domaine de la loi probabiliste commune.

De manière analogue, l'épaisseur d'une dalle ou d'un mur est une valeur finie dans les réels positifs. La même méthode peut être adoptée pour extraire les valeurs probabilistes supérieures à l'épaisseur d'une dalle ou d'un mur.

### 4.3 Résistance des aciers

La couche passive (§ A.6.2) protégeant les aciers d'armature est détruite lorsque la teneur en ions chlorures est suffisante et/ou le béton est carbonaté. Dès lors, lorsque la teneur en oxygène et la teneur en eau sont suffisantes, la corrosion s'initie (§ A.6.2). De part les conditions climatique de notre pays, la teneur en oxygène et en eau est toujours suffisante. Cependant, la propagation de la corrosion peut être très lente dans des zones d'exposition à l'abri d'une humidité trop importante. Ainsi, la résistance s'appuie sur une teneur critique en ions chlorures éliminant, dès qu'elle est dépassée, la couche de passivation.

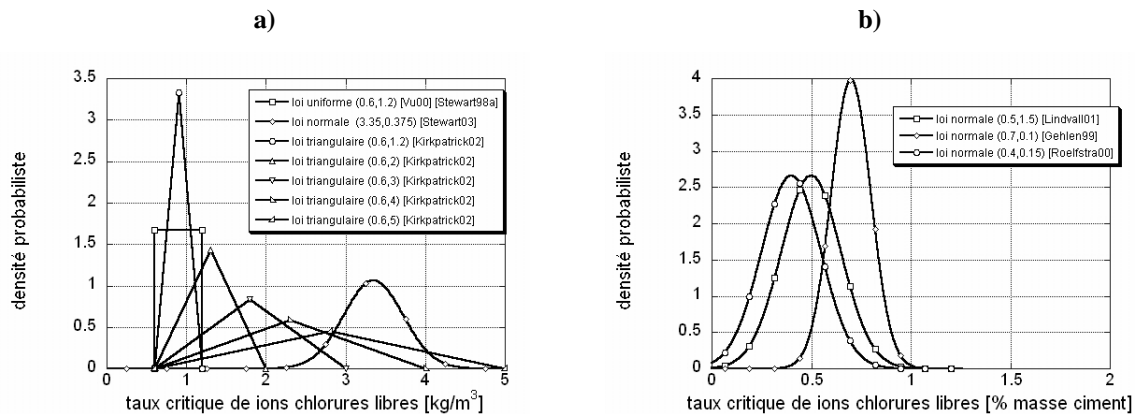


FIGURE 4.9: Teneur critique en ions chlorures pour un acier B500, éliminant la couche de passivation, a) [Stewart98a] [Stewart03] [Kirkpatrick02] [Kirkpatrick02a], b) [Lindvall01] [Gehlen99] [Roelfstra00].

Plusieurs auteurs proposent des lois probabilistes pour des aciers B500, tels des lois probabilistes uniformes, triangulaires ou normales (Figure 4.9 et Figure 4.10 a). En superposant ces lois, on perçoit qu'un très large domaine de teneur critique en ions chlorures est couvert (§ A.6.2).

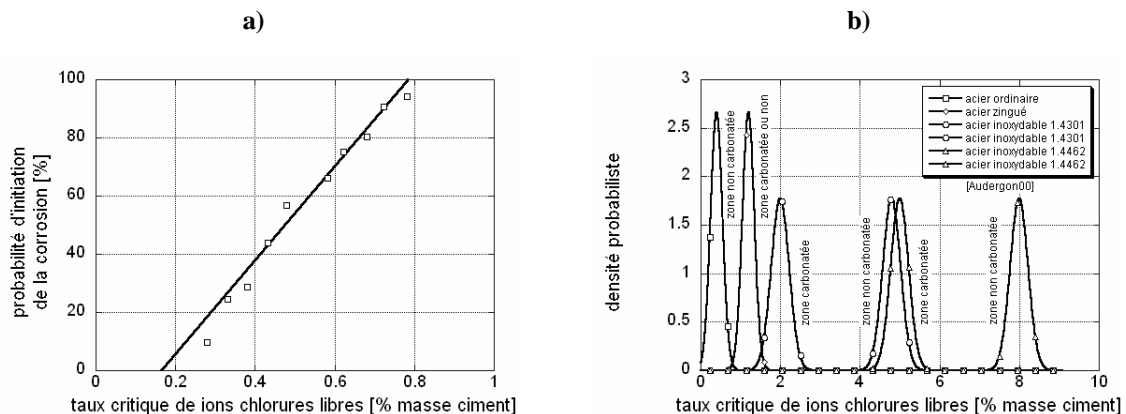


FIGURE 4.10: Teneur critique en ions chlorures, éliminant la couche de passivation, a) loi probabiliste uniforme pour un acier B500 [Breit97] [Hunkeler02], b) loi probabiliste normale pour plusieurs types d'acier [Audergon00].

Cette variabilité peut être différenciée en considérant l'élimination de la couche de passivation selon deux milieux différents,

- un milieu non carbonaté,
- un milieu carbonaté.

En fonction du milieu, le taux critique d'ions chlorures peut être évalué pour plusieurs types d'acier (§ A.6.1) différents (Figure 4.10 b).

Lorsqu'une méthode simplifiée est utilisée pour l'obtention de l'indice de fiabilité  $\beta$ , la loi probabiliste normale est adaptée (EQ. 4.6). Cependant, en comparant avec des essais [Zimmermann00], la loi probabiliste lognormale s'avère mieux adaptée (Figure 4.11) [Conciatori02a]. Lorsque les paramètres de la loi lognormale sont transformés en paramètres de la loi normale, la moyenne est légèrement supérieure à la loi proposée (Figure 4.11) [Roelfstra00] et l'écart-type est également plus importante. Cet écart-type est utilisé par la suite pour tous les types d'aciers dans les deux milieux carbonatés ou non carbonatés (Tableau 4.5).

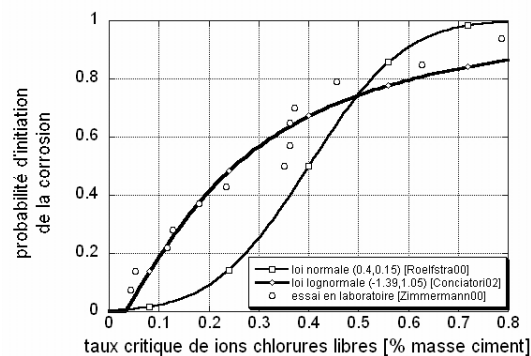


FIGURE 4.11: Teneur critique en ions chlorures pour un acier B500, éliminant la couche de passivation.

Selon le milieu, carbonaté ou non, le type d'acier est proposé ci-après pour les paramètres des lois probabilistes normales et lognormales (Tableau 4.5).

Type d'acier	Milieu non carbonaté				Milieu carbonaté			
	loi normale		loi lognormale		loi normale		loi lognormale	
	$\mu$	$\sigma$	$\lambda$	$\xi$	$\mu$	$\sigma$	$\lambda$	$\xi$
B500	0.53	0.76	-1.317	1.051	0	-	-	-
Inoxydable 1.4003	1.34	0.76	1.019	0.5289	0	-	-	-
Inoxydable 1.4301	4.8	0.76	4.7182	0.1574	2.68	0.76	2.998	0.2786
Inoxydable 1.4462	8	0.76	6.2428	0.0948	5	0.76	4.8397	0.1511

TABLEAU 4.5: Paramètres probabilistes sous forme de lois normales et lognormales en [% masse de ciment], représentant la teneur critique en ions chlorures éliminant la couche de passivation.

## 4.4 Conséquences sur les ouvrages

L'approche probabiliste permet de déterminer avec un dénominateur commun les conséquences sur les ouvrages. Ce dénominateur est la concentration en ions chlorures au niveau de l'acier d'armature dans le béton. Les simulations avec TransChlor, développées dans ce paragraphe, reprennent l'exemple

Paramètres	Variation des paramètres
ensoleillement	zone ombrée
gaz carbonique	zone industrielle
type d'épandage	épandage mécanique, épandage automatique
exposition	zone d'éclaboussures, zone de brouillard
perméabilité du béton	béton A, béton B, béton C
lieu géographique	Davos, Zurich-Kloten, Lugano, Pully
enrobage	15mm, 30mm, 40mm
type d'acier	B500, inoxydable (1.4003), inoxydable (1.4301)

TABLEAU 4.6: Paramètres étudiés avec les résultats de simulations probabilistes.

développé dans le chapitre précédent (§ 3.3). Le nombre de paramètres a été cependant simplifié, le choix s'étant porté sur ceux entraînant les variabilités les plus importantes (Tableau 4.6).

La variation des paramètres est prise en considération par des paramètres utilisant des lois probabilistes continues normales et lognormales (Tableau 4.7). Les paramètres probabilistes étudiés sont pour les paramètres de transport : le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau  $D_h$ , le coefficient de capillarité  $D_{cap}$  et le coefficient de diffusion des ions chlorures dans l'eau  $D_{Cl}$ . A ces paramètres de transport viennent s'ajouter l'épaisseur d'enrobage  $E$  et la teneur critique en ions chlorures  $c_{cr}$ .

paramètres probabilistes	perméabilité du béton ou type d'acier	$\mu$ ou $\lambda$	$\sigma$ ou $\xi$	loi probabiliste
$D_h$ [mm <sup>2</sup> /s]	A	-9.937	0.657	lognormale
	B	-9.164	0.657	
	C	-8.733	0.657	
$D_{cap}$ [mm/s]	A	-7.749	1.019	lognormale
	B	-7.287	0.087	
	C	-7.407	0.098	
$D_{Cl}$ [mm <sup>2</sup> /s]	A	-13.748	1.334	lognormale
	B	-12.419	0.837	
	C	-10.429	0.190	
	A	$2.6 \cdot 10^{-6}$	-	déterministe
	B	$5.73 \cdot 10^{-6}$	-	
	C	$30.1 \cdot 10^{-6}$	-	
$E$ [mm]		15	23	normale
		30	23	
		40	23	
		15	-	déterministe
		30	-	
		40	-	
$c_{cr}$ [% masse de ciment]	acier B500	-1.317	1.051	lognormale
	inoxydable (1.4003)	1.019	0.5289	
	inoxydable (1.4301) *	2.998	0.2786	

TABLEAU 4.7: Paramètres probabilistes, sous forme de lois normales et lognormales, utilisés dans les simulations avec le modèle TransChlor, \* en milieu carbonaté.

Les variabilités des paramètres de transport et d'épaisseur d'enrobage sont développées précédemment (§ 4.2). On peut noter cependant que l'épaisseur d'enrobage a été choisie avec une grande variabilité pouvant influencer défavorablement le temps d'initiation de la corrosion. Le choix de trois seuils limites d'ions chlorures se justifie par la volonté de prendre en considération trois types d'acier différents. L'acier B500 et l'acier inoxydable (1.4003) ont des valeurs seuils uniquement pour des aciers se situant dans un milieu non carbonaté. Dès que le milieu est carbonaté, la couche de passivation est détruite et lorsque l'oxygène et l'électrolyte sont en suffisance, la corrosion de l'acier d'armature peut se développer. Pour les aciers inoxydables (1.4301) (1.4462), le seuil limite d'ions chlorures a été choisi pour le cas le plus défavorable, soit pour un acier inoxydable (1.4301) se situant dans un milieu carbonaté. Ce choix se justifie par les résultats des simulations où la probabilité d'initiation de la corrosion est toujours nulle sur une période de 50 ans, même pour le cas le plus défavorable.

lieu géographique	perméabilité du béton		
	A	B	C
Davos	6 - 7	10 - 11	19.5 - 20.5
Zürich-Kloten	5 - 6	8 - 9	16 - 17
Lugano	7 - 8	12 - 13	23 - 24
Pully	6 - 7	10.5 - 11.5	20 - 22

TABLEAU 4.8: Profondeur de carbonatation [mm] après 50 ans d'exposition à l'environnement extérieure, provenant des résultats des simulations avec TransChlor (brouillard et éclaboussures).

Ainsi, l'initiation de la corrosion dépend d'une présence suffisante d'ions chlorures, mais peut également dépendre de la profondeur de carbonatation du béton lorsque l'on utilise des aciers B500 ou inoxydables (1.4003). Dans ces deux cas, la couche de passivation est détruite (Tableau 4.8).

Pour le béton de perméabilité C, la profondeur de carbonatation dépasse l'épaisseur d'enrobage de 15 millimètres avant le terme des 50 ans (Tableau 4.9).

lieu géographique	exposition	
	aux éclaboussures	au brouillard
Davos	29	27
Zürich-Kloten	42	39
Lugano	21	20
Pully	26.5	24

TABLEAU 4.9: Temps en années pour atteindre une profondeur de carbonatation de 15 [mm] pour le béton de perméabilité C, provenant des résultats des simulations avec TransChlor.

#### 4.4.1 Influence du coefficient de diffusion des ions chlorures dans l'eau

Le nombre de paramètres probabilistes influence le nombre de simulations (§ 4.2.1), donc également le temps de calcul pour une simulation. Parmi les paramètres probabilistes de transport, le coefficient de diffusion des ions chlorures dans l'eau est le paramètre induisant le mouvement le plus lent en comparaison du mouvement des ions chlorures entraînés par la vapeur ou l'eau liquide. Ainsi, des simulations mettent en évidence le traitement de ce paramètre de manière probabiliste et déterministe, ce qui donne une idée sur l'influence probabiliste de ce coefficient (Figure 4.12).

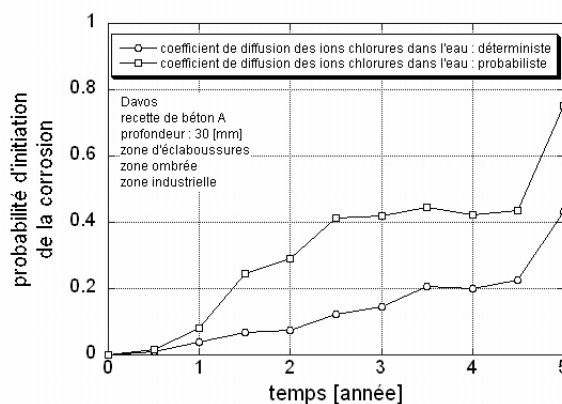


FIGURE 4.12: Influence du coefficient de diffusion des ions chlorures dans l'eau  $D_{Cl}$  sur le résultat des simulations pour un acier B500.

En utilisant le coefficient de diffusion d'ions chlorures dans l'eau comme paramètre déterministe, le temps d'initiation de la corrosion, comparée à un niveau de probabilité d'initiation de corrosion de 20% et 50%, est augmenté de deux ans. Par contre pour un enrobage déterministe (Tableau 4.10), la différence de temps est diminuée.

épaisseur d'enrobage	2 paramètres probabilistes de transport			3 paramètres probabilistes de transport		
	Pf = 20%	Pf = 50%	Pf = 80%	Pf = 20%	Pf = 50%	Pf = 80%
déterministe	3.4	6.5	9.1	1.4	4.6	> 5
probabiliste	0.18	0.36	1	0.48	0.76	5

TABLEAU 4.10: Temps en années pour atteindre un niveau de probabilité d'initiation de la corrosion Pf à 30 [mm] de profondeur, pour le béton de perméabilité A, région de Davos, acier B500 et une exposition aux éclaboussures.

L'ordre de grandeur pour ces deux cas est similaire. Ainsi, les simulations sont effectuées avec un coefficient de diffusion des ions chlorures dans l'eau déterministe.

#### 4.4.2 Variabilité de l'épaisseur de l'enrobage

La variabilité de l'épaisseur d'enrobage représente un élément d'ouvrage. Elle varie selon l'année d'exécution de la construction (normes inexistantes, absence de détails constructifs tels que les paniers de support ou les taquets) et selon l'élément d'ouvrage (dalles, parois, piliers, etc.). Deux cas extrêmes sont comparés, soit le traitement de l'épaisseur d'enrobage de manière probabiliste, soit de manière déterministe.

Si la variation du temps d'initiation de la corrosion, à différents seuils de probabilité d'initiation de la corrosion, n'est pas facilement mise en évidence pour un enrobage de 15 millimètres pour la région de Pully, elle le devient pour un enrobage de 30 millimètres pour la région de Davos. En diminuant la variabilité de l'enrobage, le temps d'initiation de la corrosion diminue également (Tableau 4.11 et Figure 4.13).

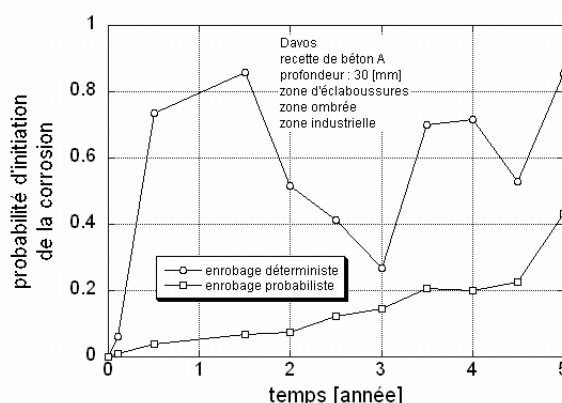


FIGURE 4.13: Sensibilité de la variabilité de l'épaisseur d'enrobage (la probabilité d'initiation de la corrosion ne peut pas diminuer voir remarque § 4.4.2).

L'évolution temporelle de la probabilité d'initiation de la corrosion (Figure 4.13 a) diminue parfois avec le temps. La concentration des ions chlorures au niveau de l'acier d'armature peut fluctuer avec l'augmentation de la durée de service, ce qui influence également le temps d'initiation de la corrosion. En considérant que la couche de passivation est éliminée selon un seuil de probabilité d'initiation de la corrosion choisi, la probabilité d'initiation de la corrosion ne peut ainsi pas diminuer. Aussi, dans l'analyse des résultats, cette considération est utilisée intuitivement.

	épaisseur d'enrobage déterministe			épaisseur d'enrobage probabiliste		
	Pf = 20%	Pf = 50%	Pf = 80%	Pf = 20%	Pf = 50%	Pf = 80%
Pully 15 [mm]	1.2	3.1	4.9	1.2	3	4.8
Davos 30 [mm]	0.2	0.4	1	3.4	6.5	9.1

TABLEAU 4.11: Temps en années pour atteindre un niveau de probabilité d'initiation de la corrosion  $P_f$ , pour le béton de perméabilité A, pour un acier B500 et pour une exposition aux éclaboussures.

Dans la suite des simulations, la variabilité des paramètres n'est plus analysée mais est prise en considération selon le tableau ci-après (Tableau 4.12).

paramètres probabilistes	loi probabiliste
$D_h$ [mm <sup>2</sup> /s]	lognormale
$D_{cap}$ [mm/s]	lognormale
$D_{Cl}$ [mm <sup>2</sup> /s]	déterministe
$E$ [mm]	normale
$c_{cr}$ [% masse de ciment]	lognormale

TABLEAU 4.12: Paramètres probabilistes et déterministes de la majorité des simulations.

#### 4.4.3 Epaisseur d'enrobage, perméabilité du béton et zones d'exposition

Dans le cas de l'exposition à l'eau liquide, telle l'exposition aux éclaboussures, la concentration des ions chlorures libres ne varie plus comme dans un processus de diffusion. Ici, le béton d'enrobage sert simplement de transit aux ions chlorures. A une profondeur plus ou moins fixe selon la perméabilité du béton, il se produit une accumulation des ions chlorures (§ 3.3).

- 20 - 30 [mm] pour un béton de perméabilité A,
- 30 - 50 [mm] pour un béton de perméabilité B,
- 30 - 60 [mm] pour un béton de perméabilité C.

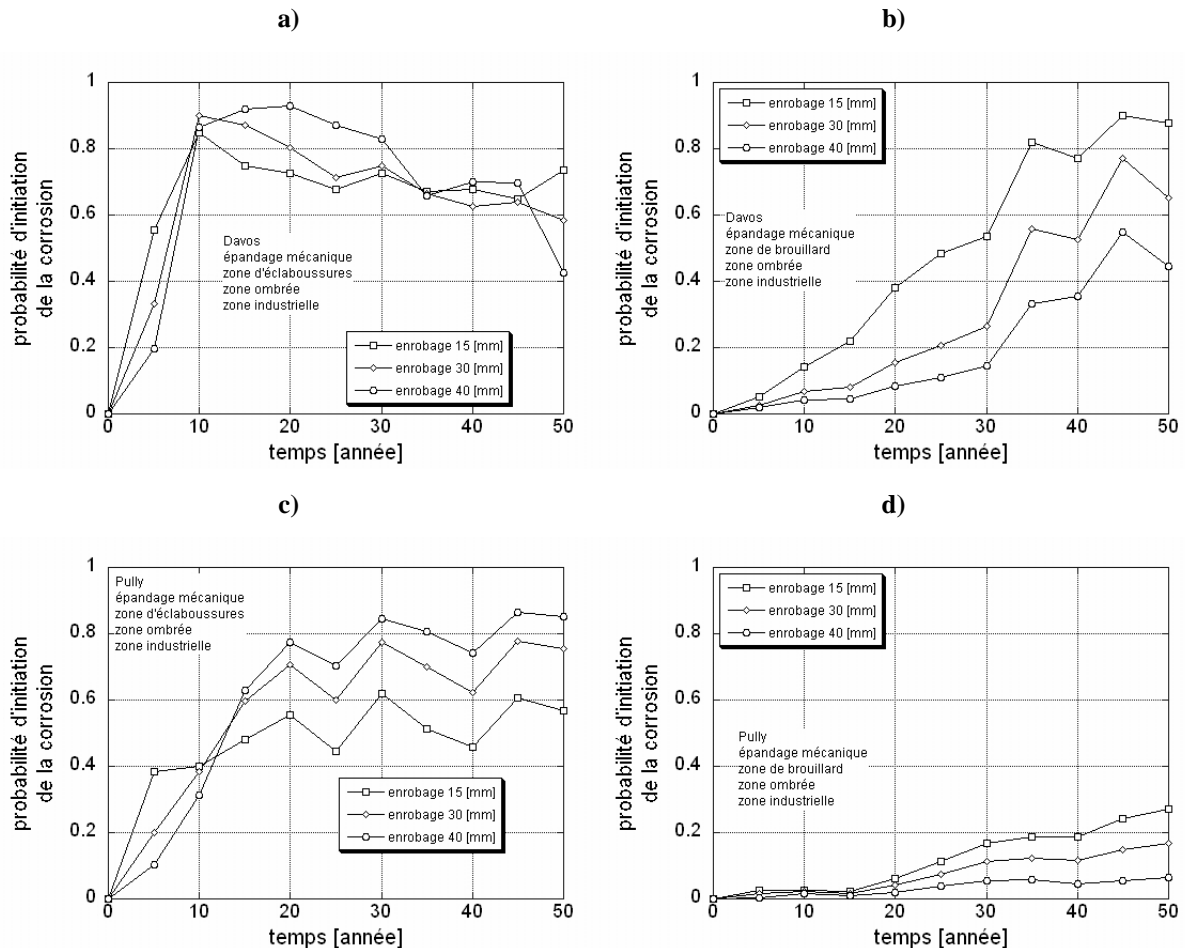


FIGURE 4.14: Influence de l'épaisseur d'enrobage sur la probabilité d'initiation de la corrosion (la probabilité d'initiation de la corrosion ne peut pas diminuer voir remarque § 4.4.2), a) à Davos, exposition aux éclaboussures, b) à Davos, exposition au brouillard, c) à Pully, exposition aux éclaboussures, d) à Pully, exposition au brouillard.

	perméabilité du béton	épaisseur d'enrobage de 15 [mm] Pf = 20% à 80%	épaisseur d'enrobage de 30 [mm] Pf = 20% à 80%	épaisseur d'enrobage de 40 [mm] Pf = 20% à 80%	probabilité d'initiation de la corrosion à 50 ans
Davos	A	1 - 5	4.5 - 7.5	9 - 9.5	
	B	1 - 2	3 - 3.5	4.5 - 5	
	C	0.5 - 1	2.5 - 3	4 - 4.5	
Lugano	A	5.5 - 8	13.9	> 50	40 - 60 %
	B	3.8	8.7	> 50	30 - 65 %
	C	2.2	6.7	> 50	35 - 65 %
Pully	A	1 - 7	3 - 13	5 - 28	
	B	1 - 2	3 - 4	5 - 16	
	C	1.2	3	4.8	
Zürich-Kloten	A	4 - 8	8 - 11	13.7	
	B	1.5 - 2.5	4 - 6	9	
	C	1.4	3.4	8.9	

TABLEAU 4.13: Temps en années pour atteindre un niveau de probabilité d'initiation de la corrosion Pf, pour un acier B500 et pour une exposition aux éclaboussures.

Cette profondeur d'accumulation prend les valeurs maximales mentionnées précédemment dans les zones où la sévérité hivernale dépasse 60 jours d'hiver par an (§ 2.1). Depuis cette zone d'accumulation, les ions chlorures diffusent plus ou moins rapidement dans le cœur du béton (Figure 3.35 c et d). L'évolution spatiale a comme incidence que la probabilité d'initiation de la corrosion est plus faible dans la zone de transit que dans la zone d'accumulation. Ainsi, les valeurs des simulations prennent en considération une valeur équivalente à la zone d'accumulation pour la zone de transit. Les simulations effectuées mettent en évidence la zone d'accumulation et de transit. La probabilité d'initiation de la corrosion varie très rapidement dans le cas d'exposition à l'eau liquide, c'est pourquoi un intervalle de temps est donné comme résultats (Tableau 4.13 et Figure 4.14 b et d). La zone de stockage est formée après environ 5 ans. Par contre, à une épaisseur d'enrobage de 15 millimètres, l'initiation de la corrosion débute après une année.

	perméabilité du béton	épaisseur d'enrobage de 15 [mm] Pf = 20%   Pf = 50%   Pf = 80%			épaisseur d'enrobage de 30 [mm] Pf = 20%   Pf = 50%   Pf = 80%			épaisseur d'enrobage de 40 [mm] Pf = 20%   Pf = 50%   Pf = 80%		
Davos	A	13.7	26.5	34.7	24.3	34	> 50	31.4	43.7	> 50
	B	5.5	12	19.3	11	17.6	26.8	14.9	23	29
	C	2.3	10.6	19.3	2.6	12.4	26.8	3.1	12.4	29
Lugano	A	33.8	> 50		> 50			> 50		
	B	16.8	> 50		28.6	> 50		38.5	> 50	
	C	5.5	50	> 50	6.6	24.8	> 50	7.7	24.8	> 50
Pully	A	41.1	> 50		> 50			> 50		
	B	22	> 50		29.4	> 50		42.1	> 50	
	C	3.8	19.8	> 50	9.4	29	> 50	12	29	> 50
Zürich-Kloten	A	13.5	30.8	47.9						
	B	6.7	12.5	21.2						
	C	1.5	3.7	8.3	1.7	4.1	8.3	2	4.9	8.6

TABLEAU 4.14: Temps en années pour atteindre un niveau de probabilité d'initiation de la corrosion Pf, acier B500 et exposition au brouillard.

L'initiation de la corrosion d'un l'élément d'ouvrage exposé au brouillard salin varie de manière croissante en fonction de l'épaisseur d'enrobage. Plus l'épaisseur d'enrobage est importante, plus le temps d'initiation de la corrosion augmente. Ceci provient du processus de diffusion de la vapeur d'eau et des ions chlorures dans l'eau (Tableau 4.14 et Figure 4.14 a et b).



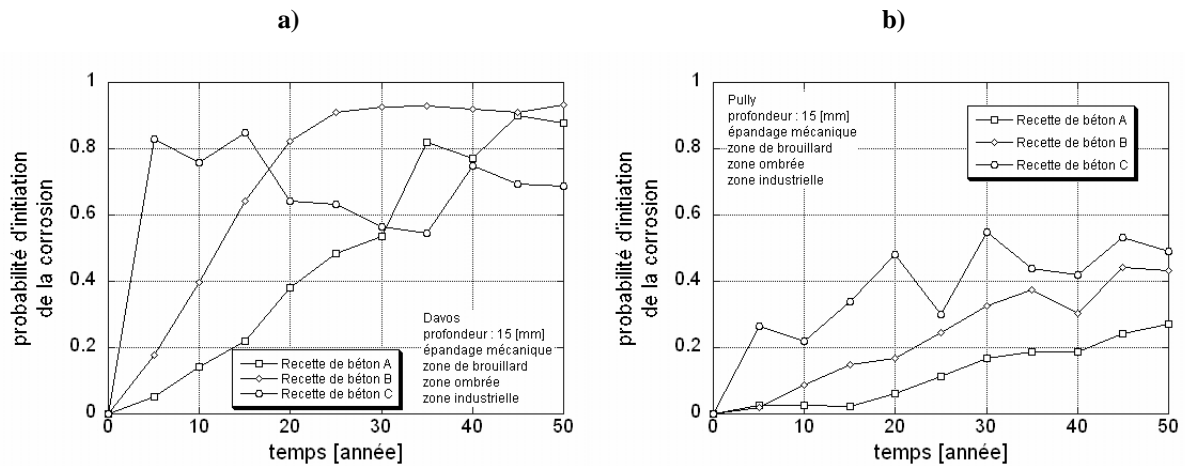


FIGURE 4.15: Influence de la perméabilité du béton sur la probabilité d'initiation de la corrosion avec une exposition au brouillard (la probabilité d'initiation de la corrosion ne peut pas diminuer voir remarque § 4.4.2), a) à Davos, b) à Pully.

Le choix de la perméabilité du béton permet également d'influencer la rapidité du temps d'initiation de la corrosion. Ainsi, plus le rapport massique de l'eau sur ciment est faible, plus le temps d'initiation de la corrosion est reporté. L'écart obtenu par les simulations est plus faible pour les zones exposées à l'eau liquide (exposition aux éclaboussures) (Tableau 4.13).

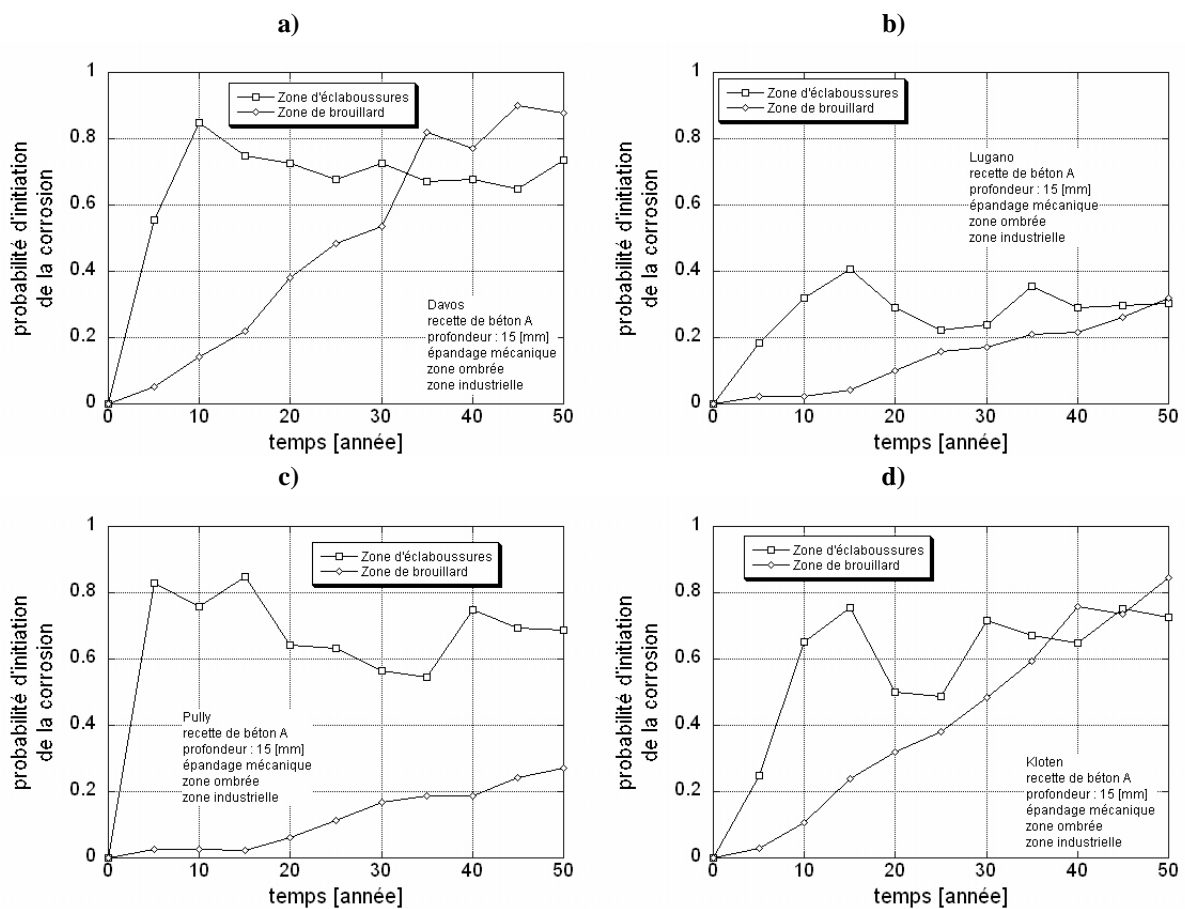


FIGURE 4.16: Influence de l'exposition de l'élément d'ouvrage sur la probabilité d'initiation de la corrosion (la probabilité d'initiation de la corrosion ne peut pas diminuer voir remarque § 4.4.2), a) Davos, b) Lugano c) Pully, d) Zürich-Kloten.

Dans les zones d'exposition au brouillard, la perméabilité du béton garde une grande importance. Toutefois, les régions humides présentent une rapidité plus importante de transfert des ions chlorures, comme pour la région de Zürich-Kloten et de Davos (Tableau 4.14, Figure 4.15 a et b).

Les zones d'exposition jouent un grand rôle puisque les propagations d'ions chlorures dans le béton sont différentes. Les zones d'exposition à l'eau liquide présentent le cas le plus défavorable pour le transit des ions chlorures (Tableau 4.13 et Figure 4.16). Par contre, les zones d'exposition au brouillard présentent un transit de diffusion des ions chlorures classiques. Dans ce cas, les ions chlorures gagnent progressivement de la profondeur et la concentration au niveau de l'acier d'armature augmente en fonction du temps (Tableau 4.14 et Figure 4.16). Ceci produit des temps d'initiation différents d'un facteur pouvant atteindre 10 à 100.

Pour les zones en contact avec le brouillard salin, l'augmentation de l'épaisseur d'enrobage reste un bon moyen pour reculer le temps d'initiation de la corrosion (Tableau 4.15, Figure 4.17 b et d).

	perméabilité du béton	épaisseur d'enrobage de 15 [mm]			épaisseur d'enrobage de 30 [mm]			épaisseur d'enrobage de 40 [mm]		
		Pf = 20%	Pf = 50%	Pf = 80%	Pf = 20%	Pf = 50%	Pf = 80%	Pf = 20%	Pf = 50%	Pf = 80%
Davos M	A	13.7	26.5	34.7	24.3	34	> 50	31.4	43.7	> 50
	B	5.5	12	19.3	11	17.6	26.8	14.9	23	29
	C	2.3	10.6	19.3	2.6	12.4	26.8	3.1	12.4	29
Davos Au	A	19.2	43	> 50	41.5	> 50		> 50		
	B	9.7	20.5	34.6	18	28	42	23	34.5	50
	C	1.6	4.1	14	2.2	5.9	14	3.2	7.4	14.9
Pully M	A	41.1	> 50		> 50			> 50		
	B	22	> 50		29.4	> 50		42.1	> 50	
	C	3.8	19.8	> 50	9.4	29	> 50	12	29	> 50
Pully Au	A	> 50			> 50			> 50		
	B	38.4	> 50		> 50			> 50		
	C	38.4	> 50		> 50			> 50		

TABLEAU 4.15: Temps en années pour atteindre un niveau de probabilité d'initiation de la corrosion Pf, pour un acier B500 et pour une exposition au brouillard, M : épandage mécanique, Au : épandage automatique.

#### 4.4.4 Type d'épandage

	perméabilité du béton	épaisseur d'enrobage de 15 [mm]	épaisseur d'enrobage de 30 [mm]	épaisseur d'enrobage de 40 [mm]	probabilité d'initiation de la corrosion à 50 ans
		Pf = 20% à 80%	Pf = 20% à 80%	Pf = 20% à 80%	
Davos M	A	1 - 5	4.5 - 7.5	9 - 9.5	
	B	1 - 2	3 - 3.5	4.5 - 5	
	C	0.5 - 1	2.5 - 3	4 - 4.5	
Davos Au	A	3 - 6	7 - 10	16.6	
	B	1.4	3.4	7.2	
	C	1.2	2.9	4.7	
Pully M	A	1 - 7	3 - 13	5 - 28	
	B	1 - 2	3 - 4	5 - 16	
	C	1.2	3	4.8	
Pully Au	A	10 - 12	> 50	> 50	25 - 45 %
	B	3.9	> 50	> 50	25 - 45 %
	C	4.4	> 50	> 50	25 - 45 %

TABLEAU 4.16: Temps en années pour atteindre un niveau de probabilité d'initiation de la corrosion Pf, pour un acier B500 et pour une exposition aux éclaboussures, M : épandage mécanique, Au : épandage automatique.

L'épandage automatique augmente favorablement le temps d'initiation de la corrosion dû à un volume d'épandage de produits de déverglaçage réduit par rapport à l'épandage mécanique. Cette augmentation est moins importante pour les zones en contact avec l'eau liquide (exposition aux éclaboussures). Pour la région de Davos, l'augmentation du temps d'initiation de la corrosion entre les deux types d'épandage est minime et l'épaisseur d'enrobage nécessaire doit se situer à l'extérieur de la zone d'accumulation des ions chlorures. Par contre, dans les régions de plaine, l'épaisseur d'enrobage peut être diminué pour des éléments d'ouvrage avec une importance moyenne à faible en tant qu'élément structural (Tableau 4.16, Figure 4.17 a et c).

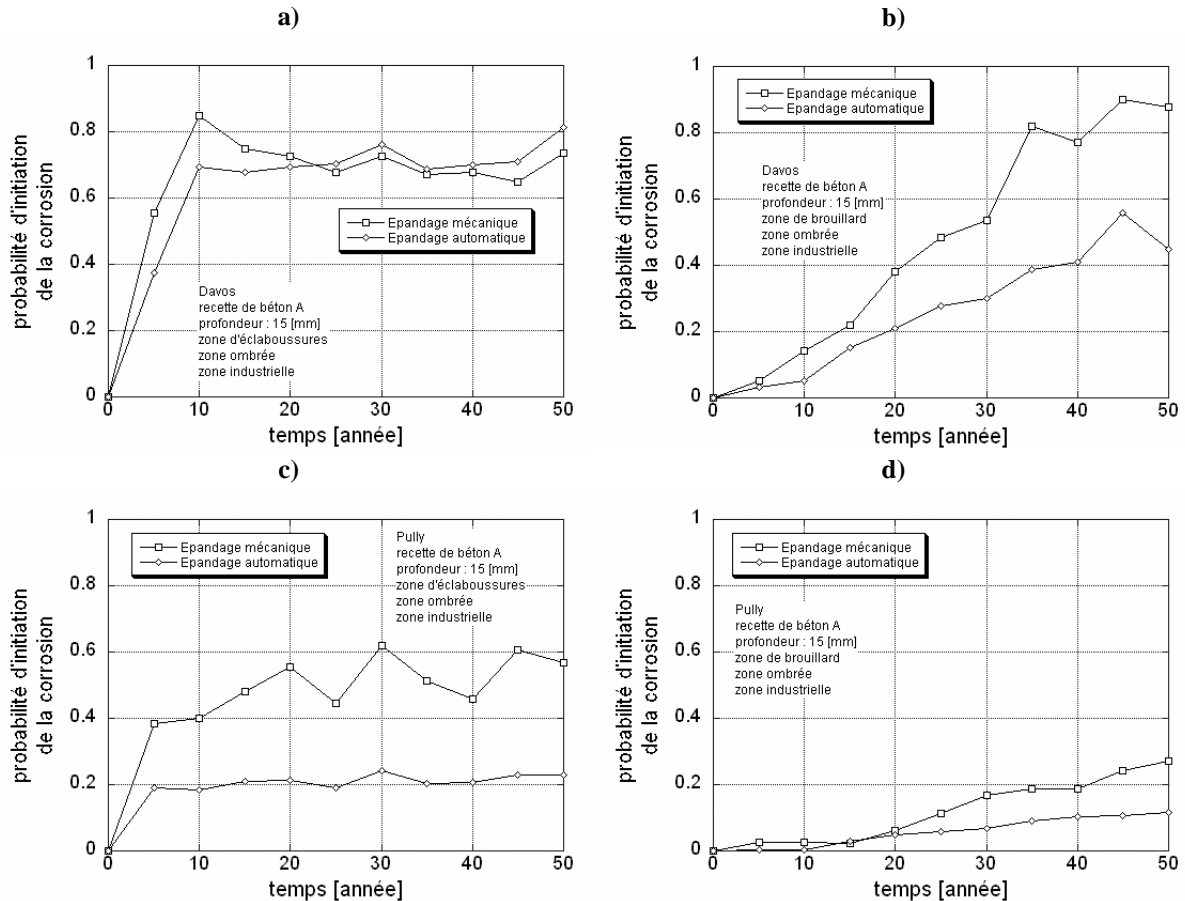


FIGURE 4.17: Mise en évidence de l'influence du type d'épandage sur la probabilité d'initiation de la corrosion (la probabilité d'initiation de la corrosion ne peut pas diminuer voir remarque § 4.4.2), a) Davos, exposition aux éclaboussures, b) Davos, exposition au brouillard, c) Pully, exposition aux éclaboussures, d) Pully, exposition au brouillard.

#### 4.4.5 Lieu géographique

A nouveau, il convient d'analyser le lieu géographique en considérant séparément les expositions à l'eau liquide et au brouillard. Pour les zones d'exposition à l'eau liquide, les probabilités d'initiation de la corrosion sont similaires pour toutes les régions étudiées, hormis la région de Lugano. Dans la région de Lugano, le volume d'épandage des ions chlorures est plus faible, induisant une probabilité d'initiation de la corrosion maximale de 40% après 50 ans de service (Figure 4.18 a).

Pour les zones d'exposition au brouillard salin, les quatre régions étudiées peuvent être regroupées en deux régions similaires, les régions humides de Davos et Zürich-Kloten et les régions modérément humides de Lugano et Pully (Figure 4.18 b).

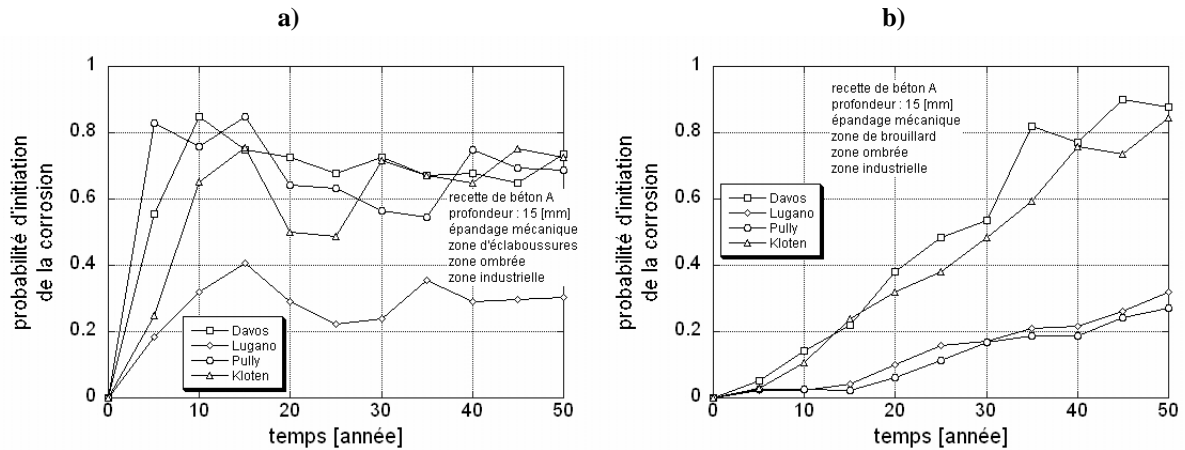


FIGURE 4.18: Mise en évidence du lieu géographique sur la probabilité d'initiation de la corrosion (la probabilité d'initiation de la corrosion ne peut pas diminuer voir remarque § 4.4.2), a) avec une exposition aux éclaboussures, b) avec une exposition au brouillard.

#### 4.4.6 Types d'acier

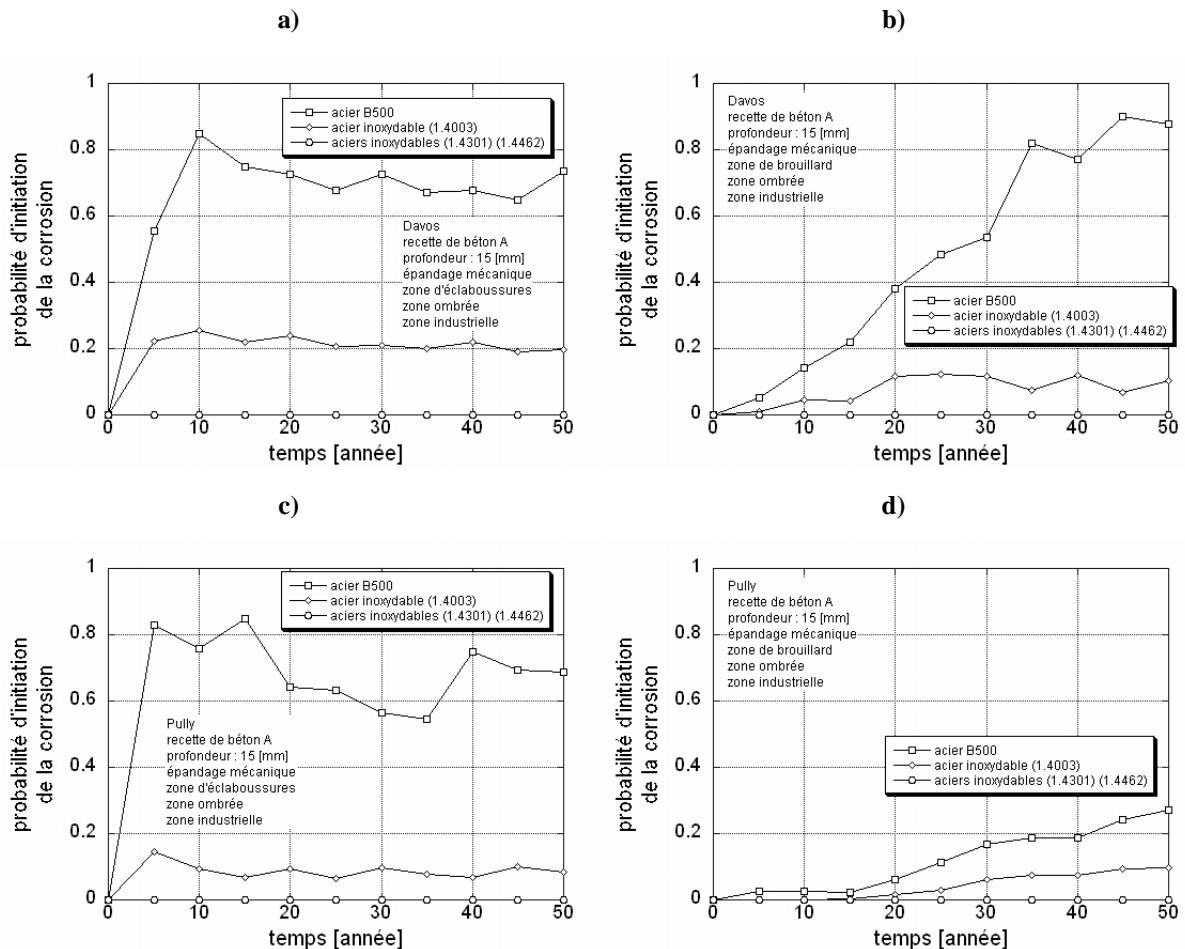


FIGURE 4.19: Influence du type d'acier sur la probabilité d'initiation de la corrosion (la probabilité d'initiation de la corrosion ne peut pas diminuer voir remarque § 4.4.2), a) Davos, exposition aux éclaboussures, b) Davos, exposition au brouillard, c) Pully, exposition aux éclaboussures, d) Pully, exposition au brouillard.

Le choix d'un type d'acier plus résistant à l'action des ions chlorures est le moyen le plus adéquat, voire indispensable afin d'augmenter le temps d'initiation de la corrosion et de lutter contre l'initiation

de la corrosion par les ions chlorures dans les milieux carbonatés (sauf pour l'acier inoxydable 1.4003). Les aciers B500 (Figure 4.19) présentent des temps d'initiation de la corrosion courts et ont été discutés précédemment (§ 4.4.1 à § 4.4.5).

L'acier inoxydable (1.4003) présente des propriétés intermédiaires aux aciers B500 et inoxydables (1.4301) (1.4462). Les probabilités d'initiation de la corrosion, relevées par les simulations numériques, présentent des taux d'initiation de la corrosion de 0 à 40% sur une période de 50 ans (Tableau 4.17 et Figure 4.19). La probabilité d'initiation de la corrosion se stabilise dans cette plage de 0 à 40%. Cependant, dès que le béton est carbonaté au niveau des aciers d'armature, la corrosion démarre.

	perméabilité du béton	exposition aux éclaboussures		exposition au brouillard	
		temps [ans] Pf = 20%	probabilité d'initiation de la corrosion à 50 ans	temps [ans] Pf = 20%	probabilité d'initiation de la corrosion à 50 ans
Davos M	A	4.5 - 7.5	25 - 40 %	> 50	10 - 18 %
	B	2.5 - 4.5	20 - 40 %		
	C	2.5 - 4.5	20 - 40 %		
Lugano M	A	> 50	43 %	> 50	0 - 10 %
	B		20.5 %		
	C		4.1 %		
Pully M	A	> 50	14 %	> 50	5 - 15 %
	B		14 %		10 - 15 %
	C		10 - 15 %		10 - 15 %
Zurich-Kloten M	A	10 - 12	20 - 35 %	> 50	0 - 20 %
	B	6 - 7	20 - 35 %		
	C	3 - 4	20 - 35 %		
Davos Au	A	50	15 - 20 %	> 50	5 - 15 %
	B	23.2	10 - 25 %		10 - 15 %
	C	3.4	15 - 30 %		10 - 15 %
Pully Au	A	> 50	0 - 10 %	> 50	0 - 5 %
	B				
	C				

TABLEAU 4.17: Temps en années pour atteindre un niveau de probabilité d'initiation de la corrosion Pf, pour un acier inoxydable (1.4003), M : dosage identique à l'épandage mécanique, Au : dosage identique à l'épandage automatique.

La probabilité d'initiation de la corrosion est nulle pour les aciers inoxydables (1.4301) (1.4462) quelque soit les perméabilités du béton, pour les trois épaisseurs d'enrobage, et ce, sur une durée de service de 50 ans (Figure 4.19).

## 4.5 Sécurité des ouvrages

Dès que la corrosion s'initie, la perte de section évolue rapidement (§ A.6.3). Une approche probabiliste avec la réduction de la section existe et est reliée directement à la sécurité structurale d'un élément d'ouvrage [Enright98] [Enright00] [Val98] [Val03] [Kong02] [Kong05]. L'indice de fiabilité  $\beta$  dans un exemple de dimensionnement de tunnel s'élève à 3.8, ce qui correspond à une probabilité de rupture de  $10^{-4}$  [Siemes98].

Dans ce travail de recherche, l'effet de la fissuration et la réduction de la section de l'acier d'armature due à la corrosion (§ A.6.3 et § A.6.4) ne sont pas pris en considération. La période de transport des ions chlorures au niveau des aciers d'armature est plus importante que le temps nécessaire pour atteindre un niveau de sécurité structurale déficient par la réduction de sections des aciers d'armature. C'est pourquoi, la probabilité d'initiation de la corrosion ne prend pas en compte la réduction de la capacité structurale. L'évaluation d'un seuil de sécurité pour un ouvrage est difficile et subjective. En associant

la probabilité d'initiation de la corrosion au risque encouru, il est possible d'établir ce seuil par une concertation des maîtres d'oeuvre et des spécialistes des ouvrages (ingénieurs) (Figure 4.20).

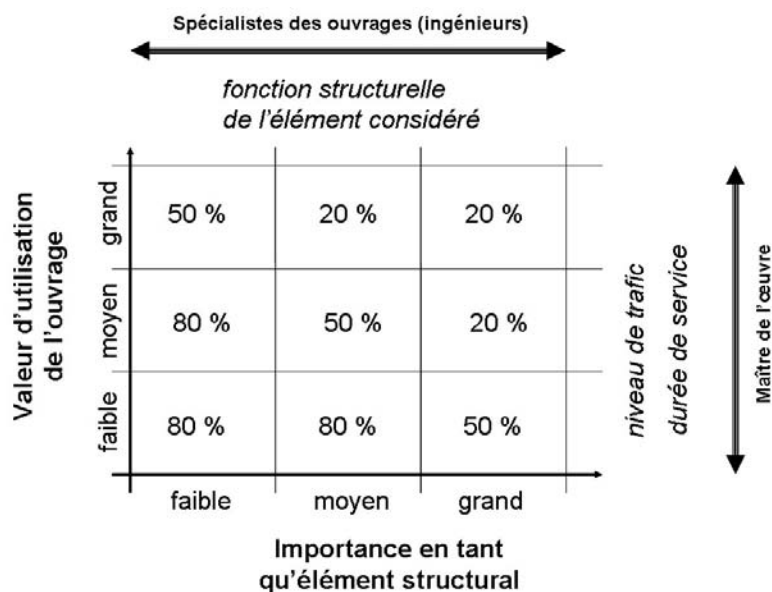


FIGURE 4.20: Matrice mettant en relation l'ouvrage et l'élément d'ouvrage pour évaluer une valeur cible requise.

La fonction structurelle de l'élément considéré doit être prise en considération selon sa fonction statique dans la structure. Cette évaluation utilise le concept développé dans l'approche segmentielle (§ A.3.5). Ainsi, la distinction peut être faite sur des éléments porteurs ayant un rôle primordial, secondaire voire non porteur sur la structure étudiée.

La «valeur d'utilisation» de l'ouvrage prend en considération l'importance de l'ouvrage dans un réseau routier et sa durée de service restante prévue. L'importance de l'ouvrage est souvent liée au niveau de trafic et au type de desserte, comme les routes à grand débit, les routes principales, les routes de liaison, les routes collectrices et les routes de desserte. La durée de service de l'ouvrage est un second paramètre planifié par le maître d'oeuvre, fixé par la demande de la société et du maître d'ouvrage et en fonction de la durabilité d'éléments d'ouvrage. Par l'intermédiaire de la durée de service de l'ouvrage, la planification d'inspections, de remises en état, de remplacements ou de reconstructions d'une structure peut influencer la valeur d'utilisation de l'ouvrage.

Les concentrations en ions chlorures libres correspondant aux probabilités d'initiation de la corrosion sont résumés ci-après (Tableau 4.18). Par comparaison, les valeurs ci-après sont recommandées dans les normes suisses SIA 262 afin d'empêcher tous problèmes de corrosion, soit 1% pour les éléments d'ouvrage non armés, 0.2% pour les éléments armés et 0.1% rapporté à la masse de ciment pour les éléments précontraints.

Probabilité d'initiation de la corrosion	Milieu non carbonaté				Milieu carbonaté	
	Acier B500	Inoxydable 1.4003	Inoxydable 1.4301	Inoxydable 1.4462	Inoxydable 1.4301	Inoxydable 1.4462
Pf = 20%	0.124	0.747	4.15	7.35	2.04	4.35
Pf = 50%	0.303	1.17	4.74	7.96	2.58	4.94
Pf = 80%	0.737	1.82	5.41	8.62	3.26	5.61

TABLEAU 4.18: Concentration en ions chlorures libres en [% masse de ciment] pour une probabilité d'initiation de la corrosion correspondante.

#### 4.5.1 Démarches qualitatives et numériques

Le flux d'eau à travers le béton gouverne le transport d'ions chlorures. Aussi, lorsque la direction du flux d'eau est connue, il est possible que le mouvement du flux d'eau avance à l'encontre du mouvement de diffusion des ions chlorures dans l'eau. Ces cas peuvent se rencontrer dans les éléments d'ouvrage dont une des faces est en contact direct, sans étanchéité, avec l'eau d'un torrent, d'une rivière, d'un lac ou d'un terrain. Ainsi, le mouvement de l'eau s'oppose à l'avancement des ions chlorures dans le béton d'enrobage et la valeur des épaisseurs d'enrobage peut être minimale, soit 20 millimètres (valeur de la norme SIA 262). Cette valeur d'épaisseur d'enrobage minimale doit être respectée pour obtenir un transfert des charges suffisant entre l'acier et le béton.

Lorsque l'on peut prévoir que le flux d'eau est nul, c'est à dire que l'élément d'ouvrage est complètement immergé dans une solution saline contenant du chlore, les modèles simplifiés (§ A.5.7) peuvent être utilisés avec une très bonne précision.

Une attention particulière doit être portée lorsque l'élément d'ouvrage se trouve à proximité d'un champ magnétique important, comme à proximité d'un transformateur ou de passages de câbles électriques. Selon l'importance du champ magnétique, le mouvement des ions chlorures dans le béton peut être plus rapide que le transport des ions chlorures par l'eau.

##### Ouvrages en béton armé existants

L'évaluation du risque de corrosion peut être appliquée pour chaque ouvrage à travers le modèle de transport TransChlor et / ou le monitoring par des capteurs d'eau et d'ions chlorures placés dans le béton d'enrobage [Laferrriere05] [Schiegg02], afin d'évaluer des stratégies d'interventions. Une méthodologie complète permet d'apprécier le risque de corrosion dans les ouvrages (Figure 4.21).

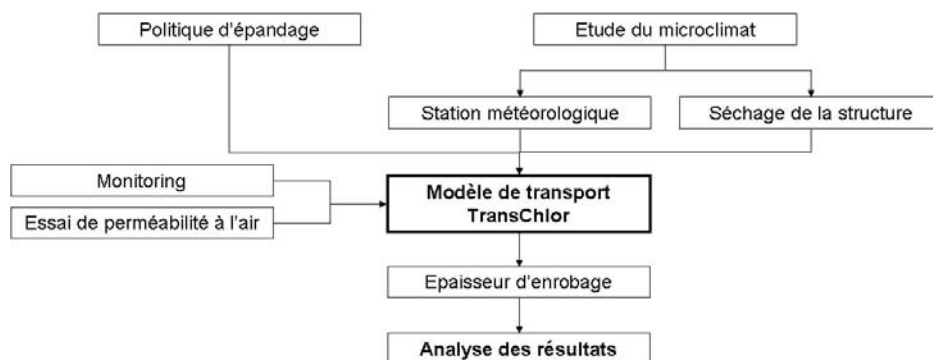


FIGURE 4.21: Méthodologie d'analyse d'un ouvrage avec le modèle de transport TransChlor.

Les autorités compétentes de la voirie fournissent des indications importantes sur la politique d'épandage de produits de déverglaçage et sur l'existence à proximité de l'ouvrage d'une station météorologique,

- la consommation annuelle de produits de déverglaçage,
- la surface totale de chaussées traitées correspondant à la consommation annuelle,
- le type de produits de déverglaçage utilisés,
- la concentration de chlore dans la solution épandue (si épandage liquide),
- la quantité épandue par passage de la saleuse,
- l'intervalle de temps minimal possible entre deux interventions ou passages de la saleuse.

Pour les ouvrages équipés d'une installation automatique de salage, l'enquête doit soulever les points suivants,

- la consommation annuelle de saumure,

- la surface totale de chaussées traitées correspondant à la consommation annuelle,
- la concentration de chlorure de sodium dans l'eau,
- l'intervalle de temps minimal possible entre deux giclages par la même assiette.

L'enquête montrera que très souvent les chlorures de sodium sont utilisés pour le déverglaçage. Cependant, pour des régions aux climats plus sévères, le chlorure de calcium peut servir d'appoint au traitement ordinaire. Lorsque l'ouvrage se situe dans une de ces zones, il est important de rapporter les consommations annuelles à une consommation de chlorure de sodium équivalente (§ C).

La station météorologique permet de simuler le microclimat. La proximité de la station de l'ouvrage reste très importante pour la représentativité des données utilisées. Les données indispensables de la station météorologique sont la température de l'air, l'humidité relative de l'air et les périodes et quantités de précipitations. Le modèle gère également l'intensité du rayonnement solaire et les hauteurs de neige.

Pour les zones des éléments d'ouvrage où une stagnation d'eau est possible, des visites in-situ permettent d'évaluer le temps de séchage dans différentes zones.

Le modèle de transport TransChlor fournit des prédictions de meilleures qualités lorsqu'une calibration est possible. Ces calibrations demandent également un investissement soit assez lourd avec le monitoring de l'ouvrage, soit avec un essai non destructif de perméabilité à l'air. Le monitoring de l'ouvrage permet d'obtenir des paramètres de transport (coefficient de diffusion de la vapeur d'eau, coefficient de capillarité, coefficient de diffusion des ions chlorures dans l'eau) permettant d'obtenir des résultats de simulations pour l'ensemble de l'ouvrage avec une très grande fiabilité. Cependant, le monitoring doit être prévu dès la conception de l'ouvrage avec si possible une station météorologique. L'essai de perméabilité à l'air permet d'obtenir le coefficient de capillarité. Ce coefficient de capillarité doit être introduit dans le modèle de transport TransChlor par le rapport massique de l'eau sur le ciment (EQ. 3.41).

Le relevé des épaisseurs d'enrobage peut être assuré par des sondes de mesures ponctuelles ou même des multisondes. Les valeurs moyennes et la variabilité peuvent être mesurées représentatives de l'élément d'ouvrage étudié.

Les simulations avec le modèle de transport TransChlor permettent d'obtenir une évaluation probabiliste du temps d'initiation de la corrosion et du risque. La stratégie d'intervention peut s'effectuer à travers la matrice de valeurs cibles (Figure 4.20).

### **Ouvrages en béton armé neufs**

L'approche numérique peut répondre à des besoins de dimensionnement, en y apportant des précisions supplémentaires pour une durée de service de l'ouvrage prédéfinie,

- l'épaisseur d'enrobage nécessaires,
- l'établissement de la perméabilité du béton,
- le type d'acier nécessaire,
- l'établissement du type de traitement du béton, par exemple, avec des enduits ou des imprégnations hydrophobes [Flueckiger94], voire par le remplacement du béton d'enrobage par un matériau plus performant, comme les bétons fibrés ultra-performant (BFUP) [Habel04].

Pour de nouvelles constructions d'ouvrages d'art, la perméabilité du béton de type «forte perméabilité» (Figure 3.19) doit être prohibé dans tous les cas. Le minimum requis et exigé doit être une perméabilité «moyenne» [Bruehwiler05].

Des simulations avec le modèle de transport TransChlor peuvent faire l'objet d'une large étude considérant le territoire suisse dans son ensemble avec l'étude d'un plus grand nombre de stations météorologiques, un plus grand domaine de perméabilités de béton et une évaluation à plus long terme avec plusieurs types d'acier, soit les aciers B500 et les aciers inoxydables. Les résultats de cette étude peuvent être ensuite regroupés sous forme d'abaque de dimensionnement et de recommandations pour la construction d'ouvrages neufs.



#### 4.5.2 Vérification ou dimensionnement d'un ouvrage

En vue d'un dimensionnement d'un ouvrage, deux vérifications doivent être effectuées,

- le contrôle de la profondeur de carbonatation
- et la concentration d'ions chlorures au niveau des aciers d'armature.

Pour les types d'acier B500 et l'acier inoxydable (1.4003), dès que le milieu est carbonaté, la corrosion démarre, lorsque la présence d'eau et d'oxygène sont suffisantes dans le béton carbonaté. Par contre, pour les aciers inoxydables (1.4301) (1.4462), même si le milieu est carbonaté, il faut une certaine concentration en ions chlorures au niveau de l'acier d'armature pour entamer la corrosion.

##### Milieu carbonaté sans présence de chlore

Pour les éléments d'ouvrage se situant dans une zone totalement sèche, la carbonatation évolue rapidement dans le béton, éliminant la couche de passivation autour de l'armature. Cependant, l'état de sécheresse empêche une initiation de la corrosion par manque de l'électrolyte.

Pour les éléments d'ouvrage se situant dans une zone complètement immergée, par exemple sous une nappe phréatique, des canaux, des digues, la carbonatation ne se développe pas dans un béton complètement saturé. Pour ces deux cas précités, l'épaisseur d'enrobage est gouvernée par les dispositions constructives.

Pour les éléments d'ouvrage se situant entre ces zones extrêmes, la corrosion peut se développer après un certain intervalle de temps. Pour garantir une durée de service d'un ouvrage entre 70 et 100 ans, les épaisseurs d'enrobage suivantes peuvent être envisagées (Tableau 4.19).

Béton A E / C = 0.42 $kT = 0.037 \cdot 10^{-16} [m^2]$	Béton B E / C = 0.52 $kT = 0.071 \cdot 10^{-16} [m^2]$	Béton C E / C = 0.73 $kT = 1.12 \cdot 10^{-16} [m^2]$	type d'acier
20	20 - 25	40 - 50	acier B500, acier inoxydable (1.4003)
20	20	20	aciers inoxydables (1.4301) (1.4462)

TABLEAU 4.19: Epaisseur d'enrobage conseillée pour un élément d'ouvrage se carbonatant, sans exposition aux chlores, E / C rapport massique de l'eau sur le ciment, kT coefficient de perméabilité à l'air, prévue pour une durée de service de l'ouvrage de 70 à 100 ans.

Dans ce cas, l'utilisation, de l'acier inoxydable n'augmente pas le temps d'initiation de la corrosion. Pour des questions d'économie, la préférence d'utilisation va à des aciers B500 face aux aciers inoxydables.

Les épaisseurs d'enrobage proposées par les normes suisses (SIA262) prennent en considération l'exposition de l'ouvrage. Pour la carbonatation, les épaisseurs recommandées sont,

- 20 [mm] pour les zones sèches ou mouillées en permanence,
- 35 [mm] pour les zones mouillées rarement sèches,
- 35 [mm] pour les zones modérément humides,
- 40 [mm] pour les zones alternativement sèches et humides.

Les recommandations pour les zones sèches ou mouillées en permanence représentent l'épaisseur d'enrobage minimale prescrite par les normes suisses, ce qui est tout à fait justifiée dans ces zones. Par contre, les recommandations des normes suisses sont quelque-peu sévères dans le cas d'utilisation de béton de perméabilité A ou B. Les simulations avec le modèle de transport TransChlor montrent des différences minimales pour des zones d'exposition au brouillard et à l'eau liquide (Figure 3.37 d et e). La vitesse de carbonatation reste légèrement plus rapide dans les zones d'exposition au brouillard (Tableau 4.19).

### Présence de chlore - exposition au brouillard salin

La première préoccupation, en présence de chlore, doit se porter sur les conditions d'exposition de l'élément d'ouvrage, en déterminant si l'élément est en contact avec de l'eau liquide saumurée ou avec un brouillard salin.

Pour l'exposition au brouillard salin, les épaisseurs d'enrobage suivantes sont conseillées pour les types d'aciers B500, en fonction de régions très humides (comme sur le plateau suisse ou en altitude, humidité relative annuelle moyenne supérieure à 73%) ou modérément humides (sur le reste du territoire suisse, humidité relative annuelle moyenne inférieure à 72.5%) (Tableau 4.20). Les épaisseurs d'enrobage proposées par les normes suisses (SIA 262) s'élèvent à 40 millimètres pour ces zones d'exposition. Cette valeur correspond assez bien aux simulations avec le modèle de transport Trans-Chlor simulés pour les régions très humides. Cependant, cette valeur peut être diminuée dans les régions modérément humides.

région	probabilité d'initiation de la corrosion	Béton A E / C = 0.42 $kT = 0.037 \cdot 10^{-16} [m^2]$	Béton B E / C = 0.52 $kT = 0.071 \cdot 10^{-16} [m^2]$	Béton C E / C = 0.73 $kT = 1.12 \cdot 10^{-16} [m^2]$
très humide	Pf = 20%	45	45	>45
	Pf = 50%	40	45	>45
	Pf = 80%	30	45	>45
modérément humide	Pf = 20%	30	30	45
	Pf = 50%	20	20	45
	Pf = 80%	20	20	30

TABLEAU 4.20: Epaisseur d'enrobage conseillée pour un élément d'ouvrage se carbonatant, exposition au brouillard salin, pour des aciers B500, E / C rapport massique de l'eau sur le ciment, kT coefficient de perméabilité à l'air, prévue pour une durée de service de l'ouvrage de 70 à 100 ans.

Lorsque l'ouvrage se situe sur une zone d'épandage automatique et lorsque l'épandage mécanique est totalement exclu, les épaisseurs d'enrobage des régions modérément humides peuvent être réduites de 5 à 10 millimètres. Pour des raisons constructives, l'épaisseur d'enrobage minimale reste de 20 millimètres. Pour les zones protégées, ayant un contact avec l'humidité relative de l'air, comme à l'intérieur de caissons, les épaisseurs d'enrobage proposées pour les milieux carbonatés peuvent être utilisées.

### Présence de chlore - exposition à l'eau liquide saumurée

L'entraînement des ions chlorures par l'eau soumis à la succion capillaire est très rapide dans le béton armé. Un capteur, placé à 20 millimètres, a montré le passage du front d'ions chlorures après quelques heures (§ 3.1.6.3). Aussi, l'utilisation d'acier B500, sans aucune autres mesures est à éviter. Ces mesures peuvent être les suivantes,

- traitement avec une imprégnation hydrophobe du béton, ou des enduits étanches, ou des glaces,
- choix d'un acier d'armature résistant aux ions chlorures,
- remplacement du béton d'enrobage par un matériau plus performant, comme les bétons fibrés ultra-performant (BFUP) [Habel04],
- par des méthodes électrochimiques, telles que la réalcalinisation, l'extraction de chlorure et la protection cathodique contre la corrosion [Bruehwiler04],
- prévoir une durée de service restreinte de l'élément d'ouvrage et remplacer le béton d'enrobage ou l'élément d'ouvrage.

Ce dernier point est à éviter. Prévoir une durée de service restreinte de l'élément d'ouvrage est une politique, occasionnant des dépenses d'entretiens et des coûts indirectes trop importants pour les ouvrages d'art. Néanmoins, ce cas peut se présenter lors d'exploitation limitée dans le temps d'un ouvrage, comme les ouvrages provisoires.

Pour une durée de service de l'élément d'ouvrage de 25 ans, l'épaisseur d'enrobage dépasse les cents millimètres pour un climat de montagne. Pour un climat de plaine, l'épaisseur d'enrobage se situe entre 50 et 100 millimètres pour les recettes du béton peu perméable. On peut noter que ces résultats sont tirés de simulations calculés avec une variabilité importante de l'épaisseur d'enrobage, ce qui peut influencer défavorablement le temps d'initiation de la corrosion. Ces résultats rejoignent la politique adoptée par l'office fédérale des routes, où les bordures de pont (acier B500 avec 40 millimètres d'épaisseur d'enrobage) sont remises à neuf tous les 20 à 30 ans [Tobola05] (Tableau 4.21). Les prescriptions des normes suisses (SIA262), préconisant 55 millimètres, sont largement insuffisantes.

région	probabilité d'initiation de la corrosion	Béton A E / C = 0.42 $kT = 0.037 \cdot 10^{-16} [m^2]$	Béton B E / C = 0.52 $kT = 0.071 \cdot 10^{-16} [m^2]$	Béton C E / C = 0.73 $kT = 1.12 \cdot 10^{-16} [m^2]$
plaine	Pf = 20%	96	129	253
	Pf = 50%	78	92	183
	Pf = 80%	44	81	118
montagne	Pf = 20%	149	197	255
	Pf = 50%	129	176	244
	Pf = 80%	105	141	195

TABLEAU 4.21: Epaisseur d'enrobage conseillée en millimètres après 25 ans de mise en service pour un élément d'ouvrage confectionné avec des aciers B500 avec une exposition aux chlores, E / C rapport massique de l'eau sur le ciment, kT coefficient de perméabilité à l'air.

En cas d'utilisation d'imprégnation hydrophobe (§ 3.2.3.5), le produit testé dans ce travail de recherche fournit des conditions d'exposition proche de l'exposition au brouillard salin. Aussi, les épaisseurs d'enrobage conseillées pour l'exposition au brouillard peuvent être utilisées (Tableau 4.20). Beaucoup de produits existent sur le marché et les paramètres principaux pour les choix doivent se baser sur l'efficacité du produit et sur la durée de service de ce dernier.

Lorsque l'on utilise des aciers inoxydables (1.4003), l'épaisseur d'enrobage n'a pas une grande importance, car la probabilité d'initiation de la corrosion reste stable aux environs de 0 à 40%, selon les régions étudiées. L'épaisseur d'enrobage, dans le cas d'utilisation de ces aciers, est gouvernée par l'évolution de la carbonatation. Pour les aciers inoxydables (1.4301) (1.4462), aucune initiation de la corrosion n'est apparue après 50 ans de service. Aussi ces aciers peuvent être utilisés dans le cas où les conditions de sollicitation, la valeur d'utilisation de l'ouvrage et l'importance en tant qu'élément structural sont très importantes (Figure 4.20).

Le remplacement du béton d'enrobage par des matériaux cimentaires avancés, comme les bétons fibrés ultra-performant (BFUP), améliore la durabilité des ouvrages en agissant comme une couche de protection [Charron04]. Un projet pilote est actuellement en cours pour évaluer les performances du BFUP sur les ouvrages pour des applications réelles. La faible perméabilité du BFUP empêche pratiquement la pénétration de substances agressives. Aussi, la longévité des structures est garantie en cas de non fissuration, ceci sans travaux de maintenance lourds [Samaris05].

## 4.6 Conclusions

14. La probabilité d'initiation de la corrosion des aciers d'armature dans un élément d'ouvrage en béton est obtenu selon une approche probabiliste, décrivant la «sollicitation» par la concentration des ions chlorures au niveau de l'acier d'armature et la «résistance» par la concentration des ions chlorures limites auxquels un dépassement élimine la couche de protection autour de l'acier d'armature.

15. La sollicitation est représentée par des lois probabilistes continues lognormales pour les paramètres de transport (coefficient de diffusion de la vapeur d'eau, coefficient de capillarité, coefficient

*de diffusion des ions chlorures dans l'eau) et par des lois probabilistes continues normales pour l'épaisseur d'enrobage des aciers d'armature pour l'élément d'ouvrage considéré.*

- 16. Les paramètres de transport s'insèrent dans le modèle de transport TransChlor avec la méthode de Rosenblueth. L'épaisseur d'enrobage peut être prise en considération par la formulation de Bayes (méthode de moyenne pondérée).*
- 17. La résistance à la corrosion des aciers d'armature est représentée par des distributions (lois log-normales) pour décrire une concentration limite en ions chlorures au-delà de laquelle la couche de passivation, protégeant l'acier d'armature, est éliminée. Ces lois probabilistes lognormales, dépendant du type d'acier (les aciers B500 ou les aciers inoxydables) utilisé et du milieu dans lequel il se trouve (béton carbonaté ou non carbonaté), sont proposées.*
- 18. Le temps d'initiation de la corrosion pour des éléments d'ouvrage en contact avec de l'eau liquide et de la saumure est de 20 à 30 ans. La qualité du béton d'enrobage n'améliore pas les conditions dans ces zones d'exposition pour des bétons conventionnels. Par rapport à une durabilité souvent exigée de 100 ans pour un élément en béton armé, ceci signifie que des dispositions supplémentaires aux recettes de béton et aux épaisseurs d'enrobage des aciers d'armature doivent être envisagées.*
- 19. Les éléments d'ouvrage en contact avec du brouillard salin peuvent être dimensionnés en choisissant un béton de faible perméabilité du béton et d'épaisseur d'enrobage des aciers d'armature suffisante. Ce dimensionnement peut être plus contraignant lorsque l'ouvrage se situe dans une région particulièrement humide. Aussi, l'utilisation d'acier d'armature plus résistant aux ions chlorures, tels que les aciers inoxydables, peut s'avérer être judicieux.*
- 20. Les simulations avec le modèle TransChlor confirment que la corrosion des aciers d'armature dans un béton carbonaté est moins rapide et un dimensionnement de l'épaisseur d'enrobage suffit.*

## 5 Synthèse

*L'étude de la cinétique de la progression de l'altération chimique dans le béton nécessite une étude pluridisciplinaire dans les domaines des sciences de base et des sciences de l'ingénieur. Les connaissances nécessaires font appel aussi bien à l'ingénierie des structures qu'aux sciences des matériaux, de la chimie, de la météorologie, de la physique, de la mécanique, des mathématiques et de l'informatique.*

*Le comportement du béton face à l'action de l'eau et l'approche probabiliste constituent des connaissances nouvelles dans le domaine des sciences de base. La modélisation du microclimat et de la présence d'agents agressifs, les principaux résultats des simulations et les recommandations principales constituent assurément une amélioration des connaissances des sciences de l'ingénieur.*

### 5.1 Science de base

Des essais en laboratoire à microclimat réel reconstitué (basses températures) ont mis en évidence l'adsorption d'eau liquide par succion capillaire. Ces conditions accélèrent la vitesse de transfert des ions chlorures entraînés par l'eau. Les ions chlorures transitent rapidement de la surface vers le cœur du béton, formant ainsi une zone d'accumulation située à environ 30 à 60 millimètres de la surface (selon la perméabilité du béton d'enrobage). Depuis cette zone, les ions chlorures continuent leur chemin vers le cœur du béton mais à des vitesses inférieures. Il en résulte une évolution temporelle progressive de la concentration des ions chlorures. Ce phénomène, prédit par les simulations numériques effectuées à l'aide du modèle de transport TransChlor, a été validé par une thèse conjointe [Laferriere05].

La présence de brouillard salin, sans présence d'eau liquide, engendre un processus de diffusion de la vapeur d'eau et des ions chlorures nettement plus lent qu'en cas de présence d'eau liquide. Les essais sur des bétons traités avec une imprégnation hydrophobe ont montré que la vitesse de transfert de l'eau liquide est négligeable. Par conséquent, ces bétons traités avec des enduits hydrophobes tendent à augmenter significativement la durée d'initiation de la corrosion des aciers d'armature.

Une approche probabiliste permet d'évaluer les niveaux de sollicitation et de résistance de l'acier d'armature soumis aux ions chlorures. Cette évaluation conduit à l'obtention de la probabilité d'initiation de la corrosion des aciers d'armature dans un élément d'ouvrage en béton. Les sollicitations sont obtenues notamment par des simulations (concentration des ions chlorures dans le béton) qui tiennent compte de la variabilité des épaisseurs d'enrobage. La méthode de Rosenblueth, méthode voisine de la méthode de Monte-Carlo, permet de traiter plusieurs paramètres probabilistes et de les insérer dans le modèle de transport. L'épaisseur d'enrobage est par la suite combinée aux résultats du modèle de transport par la formulation de Bayes ou par une méthode de moyenne pondérée.

### 5.2 Science de l'ingénieur

Le modèle de transport TransChlor permet de prendre en considération, par une approche numérique, différents modes de transport et leurs interactions entre eux (transfert thermique, transfert hydrique de vapeur d'eau et d'eau liquide par succion capillaire, diffusion du gaz carbonique et réaction de carbonatation avec la pâte de ciment, diffusion des ions chlorures dans l'eau et entraînement des ions chlorures par l'eau).

Le modèle de transport se base essentiellement sur deux transformations chimiques : les réactions de carbonatation et l'adsorption des ions chlorures par la pâte de ciment. Cette dernière est une transformation réversible. Les mouvements par diffusion sont des transferts de molécules ou d'ions dans un fluide interstitiel de régions à fortes concentrations vers des régions à faibles concentrations. Ils sont modélisés par les équations de base de potentiel chimique, aboutissant à une forme simplifiée de la loi de diffusion de Fick. Par contre, le mouvement d'eau liquide par succion capillaire est provoqué par la tension superficielle agissant dans les pores capillaires. Le mouvement d'eau liquide est modélisé sur la base des équations de la cinétique. Il est ensuite transformé en mouvement d'ions chlorures par un algorithme particulier (simulant l'entraînement des ions chlorures par l'eau).

Le modèle TransChlor repose sur une modélisation des ouvrages d'art qui permet une dissociation de la structure de base en éléments constitutifs distincts, chaque élément étant homogène sur les plans fonctionnel, structurel ainsi que sur le plan de la sensibilité au phénomène de corrosion (perméabilité du béton d'enrobage, degré d'exposition aux agents corrosifs, défauts locaux). Le modèle distingue notamment les éléments d'ouvrages exposés au brouillard et à l'eau liquide. Des gabarits sont proposés pour définir des zones d'éclaboussures (zone de présence d'eau liquide) en fonction de la vitesse des véhicules. Le modèle est paramétré sur la base de mesures in-situ (dont le monitoring d'un ouvrage - stations météorologiques) et d'enquêtes auprès des autorités publiques.

Le modèle TransChlor, capable d'évaluer la durée du processus d'initiation de la corrosion, constitue une aide à la décision permettant d'inclure la problématique de la corrosion des aciers d'armatures lors de la planification des stratégies de maintenance d'ouvrages existants ou lors du dimensionnement d'éléments d'ouvrages neufs. Le modèle peut également contribuer à l'élaboration de documents normatifs. Dans les zones exposées à l'eau liquide et à la saumure, les normes devraient imposer des dispositions supplémentaires telles qu'imprégnations hydrophobes, utilisation d'aciers inoxydables, etc. Pour les autres cas (exposition au brouillard salin et pour les bétons carbonatés sans présence d'ions chlorures), les normes devraient exiger des dispositions constructives complémentaires.

### 5.3 Perspectives

Le nombre croissant de détériorations dues à la réaction alcali-granulat sur les ouvrages d'art donne une impulsion nouvelle à la recherche dans ce domaine. La réaction alcali-granulat est une réaction chimique entre les granulats constitutifs du béton et la solution interstitielle alcaline dans la pâte de ciment durcie. Cette transformation chimique s'accompagne d'une augmentation de volume des granulats provoquant des fissurations sous forme d'écaillage.

Des processus de détériorations similaires se rencontrent lors de la réaction des sulfates (contenues dans l'eau de mer), du processus de gel/dégel et lors de la corrosion des aciers. Les réactions chimiques ou le changement d'état de l'eau provoquent l'expansion d'un des composants du béton et une fissuration subséquente, sous forme d'écaillage.

Tous les phénomènes de détériorations présentés ci-dessus dépendent étroitement du transport de l'eau dans la masse du béton ainsi que de la perméabilité de ce dernier. Par conséquent, cette étude, qui met en évidence ce transport d'eau, ouvre de nouvelles perspectives de recherche visant à mieux comprendre les mécanismes physico-chimiques régissant ces processus de dégradations.

D'autre part, le modèle, la compréhension des phénomènes de corrosion peut être améliorée par une combinaison d'un modèle de prédiction, tel que TransChlor, et d'un monitoring d'ouvrages d'art. Ces dernières années ont vu l'émergence et le développement de nouveaux capteurs capable de mesurer les quantités d'eau et de ions chlorures dans les pores du béton, permettant un monitoring approfondi de la peau du béton. Dans ce contexte, la répartition spatiale des capteurs (tels que capteurs d'humidité et de mesures de concentration d'ions chlorures) peut être choisie sur la base des résultats du modèle de prédiction. D'autre part, ce dernier permettrait également l'analyse des conditions d'exposition des éléments d'ouvrages, de raffiner les aspects probabilistes, d'une interprétation plus fine des signaux fournis par les capteurs et ainsi une validation du développement de la corrosion dans les ouvrages.

L'initiation de la corrosion est perceptible au travers l'étude du champ magnétique et du courant électrique proche et sur l'acier d'armature. Le développement de la corrosion au stade d'initiation est encore peu connue quant à la participation de l'eau, de l'oxygène et à l'élimination de la couche de passivation. Des travaux de recherche, entrepris dans cette direction, représentent une complémentarité à ce travail de recherche.

## 6 Symboles

### Majuscules latines

A		matrice composée des différents coefficients de diffusion et d'autres coefficients, paramètre obtenu d'une régression linéaire à partir de données expérimentales valant $1.64 \cdot 10^{-6}$ ,
	$[m^2]$	section de pénétration du gaz,
	$[kg/m^2 s^{0.5}]$	coefficient de capillarité, paramètre de l'isotherme de Freundlich,
$A_1$	$[m^2/h]$	paramètre de la loi de Mensi,
$A_2$	$[-]$	paramètre de la loi de Mensi,
$A_c$	$[mm^2]$	surface dans la fissure,
$A_m$	$[mm^2]$	surface dans le béton sain,
$A_{tot}$	$[g]$	surface de chaussées, où l'épandage a été effectué,
B		exposition au brouillard, prise en compte de la carbonatation,
	$[m/s^{0.5}]$	coefficient de pénétration,
	$[kg \cdot mm/m^3]$	surface reliant la concentration des ions chlorures à une distance rapportée aux dimensions des éléments finis, facteur de proportionnalité,
$[B(x)]$		matrice de relation flux et concentration de v,
$B_{CSH}$		taux de calcium hydraté en fonction du ciment,
$B_{ext}$		conditions de bord,
C	$[kg/m^3 \text{ de béton}]$	quantité de ciment, matrice composée de coefficients de convection et d'autres coefficients,
	$[kg/m^3]$	concentration en ions chlorures totaux rapportée au volume du béton,
	$[kg/m^3]$	concentration en ions chlorures rapportée au volume de béton,
$C_1$	$[mol/cm^3]$	concentration des ions chlorures à la cathode,
$[C_2S]$	$[mol/m^3 \text{ béton}]$	concentration molaire du silicate de dicalcium,
$[C_3S]$	$[mol/m^3 \text{ béton}]$	concentration molaire du silicate de tricalcium,
$C_B$	$[kg/m^3]$	concentration en ions chlorures capturées par la pâte de ciment rapportée au volume du béton,
$C_{BET}$		paramètre d'adsorption de la vapeur d'eau du modèle BET,
$C_c$		paramètre provenant d'un ajustement avec des essais en laboratoire,
$C_{epandouse}$	$[-]$	concentration en chlorure de sodium de la saumure dans l'épandouse,
$C_F$	$[kg/m^3]$	concentration en ions chlorures libres dans les interstices du béton rapportée au volume du béton,
CL		exposition aux ions chlorures en période hivernale,
$C_o$	$[-]$	rapport massique entre les chlorures de sodium et l'eau liquide, appelé également concentration en chlorure de sodium de la saumure,
	$[^{\circ}C]$	variable de substitution, valant 855,

$C_{o,i}$	[-]	rapport massique entre les chlorures de sodium et l'eau liquide incrémenté dans le temps avec la position i,
$C_T$	[kg/m <sup>3</sup> ]	concentration en ions chlorures totaux rapportée au volume du béton,
[CSH]	[mol/m <sup>3</sup> béton]	concentration molaire du silicate de calcium hydratée,
D	[kg/m <sup>3</sup> de béton]	quantité d'ajout, par exemple un fluidifiant,
	[kg.mm/m <sup>3</sup> ]	surface reliant la concentration des ions chlorures à une distance rapportée aux dimensions des éléments finis,
	[m <sup>3</sup> /s]	coefficient de diffusion des ions chlorures dans l'eau,
	[mm <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion des ions chlorures moyen,
[D]		matrice d'assemblage n+1 x n+1,
$D_0$	[mm <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion des ions chlorures dans le béton d'enrobage non fissuré,
$D_1$	[mm <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion des ions chlorures dans la fissure,
$D_{o,T_0}$	[m <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion intrinsèque des ions chlorures, déterminé par l'essai rapide CTH [Tang96],
$D_a$	[m <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion des ions chlorures dans les agrégats,
$D_B$	[mm <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion du gaz carbonique dans le béton,
$D_{cap}$	[mm/s]	coefficient de capillarité,
$D_{cap,to}$	[mm/s]	coefficient de capillarité au début du contact avec l'eau liquide,
$D_{Cl}$	[m <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion des ions chlorures,
	[cm <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion effectif,
	[mm <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion des ions chlorures dans l'eau,
$D_{Cl,b}$	[mm <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion des ions chlorures liés à la pâte de ciment,
$D_{Cl,i}$	[m <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion des ions chlorures au temps t = 0,
$D_{Cl,FS}$	[m <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion des ions chlorures dans un béton avec ajout de fumée de silice,
$D_{Cl,t}$	[mm <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion des ions chlorures totaux,
$D_{e,Ca(OH)_2(aq)}$	[mm <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion de la portlandite sous forme aqueuse,
$D_{ei}$	[m <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion effectif,
$D_h$	[mm <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion de la vapeur d'eau,
$D_i$	[m <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion,
	[mm <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion des ions chlorures dans les agrégats,
$D_{i,m}$	[m <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion effectif,
$D_m$	[mm <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion des ions chlorures dans la matrice du ciment,
$D_p$	[m <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion des ions chlorures dans la pâte de ciment,
$D_{T_0}$	[mm <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion en régime permanent et à température constante,
$D_w$	[m <sup>2</sup> /h] [m <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion de la teneur en eau dans le béton,
E		exposition aux éclaboussures,
	[kg/m <sup>3</sup> de béton]	quantité d'eau de gâchage,
	[V/m]	champ électrique,



$E_1$	[J/mol]	adsorption totale de la vapeur d'eau,
$E_b$	[mol/J]	énergie d'activation du modèle d'Arrhénius,
$E/C$	[-]	rapport massique de l'eau sur le ciment,
$E_D$	[J/mol]	énergie d'activation du modèle d'Arrhénius,
$E_L$	[J/mol]	adsorption latente de la vapeur d'eau,
$E_{NaCl}$	[kg/m <sup>2</sup> ]	quantité surfacique d'épandage de chlorures de sodium, lors du passage de l'épandeuse,
$E_{sol}$	[Wh/m <sup>2</sup> ]	puissance horaire par unité de surface fournit par le soleil,
$E[x]$		moyenne pondérée d'un échantillon x,
$F$		poids de la transformation d'une loi probabiliste continue en distribution discrète,
	[C/mol]	constante de Faraday ( $9.6485 \cdot 10^4$ ),
$F_R$		fonction probabiliste continue cumulée, représentant la résistance,
$FS$	[%]	taux d'addition de fumée de silice rapporté à la masse de ciment,
$G$	[kg/m <sup>3</sup> de béton]	quantité de granulats,
$H$	[%]	humidité relative dans les pores du béton,
	[-]	humidité relative dans les pores du béton,
	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> béton]	teneur en eau,
$H_c$		coefficient du modèle de Bazant,
$H_{ext}$	[-]	humidité relative atmosphérique moyenne depuis la confection d'un béton jusqu'au temps traité,
$Hr_i, Hr_{i-1}$	[%]	humidité relative de l'air à l'instant i respectivement à l'instant i-1,
$I$	[W/m <sup>2</sup> ]	rayonnement global,
$[I]$		matrice identité,
$I_{corr}$	[A]	courant de corrosion,
$[J]$		matrice de transformation, appelé jacobien (ici en l'occurrence, il s'agit d'une matrice 1x1),
$J_{Cl}$	[kg/m <sup>2</sup> s]	flux des ions chlorures,
	[mol/cm <sup>2</sup> s]	flux des ions chlorures,
$J_i$	[mol/m <sup>2</sup> s]	flux du ion i,
$K_0$		paramètre provenant d'un ajustement avec des essais en laboratoire,
$K_g$	[m <sup>2</sup> ]	coefficient de perméabilité du gaz,
$K_s$		paramètre provenant d'un ajustement avec des essais en laboratoire,
$KT_i$	[10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ]	coefficient brut de perméabilité à l'air,
$KT_{i,corr}$	[10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ]	coefficient de perméabilité à l'air, corrigé avec les essais de résistivité électrique Wenner,
$L$		longueur dans l'échelle des coordonnées cartésiennes de l'élément fini,
	[mm]	longueur d'un élément fini, borne d'intégration gauche,
$L_c$	[m]	profondeur de pénétration du front d'eau,
$M$	[g/mol]	masse molaire de l'eau,

$M_{CaCl_2}$	[g]	masses des chlorures de calcium,
$M_{NaCl}$	[g]	masses des chlorures de sodium,
$M_{NaCl,eq}$	[g]	masses des chlorures de calcium rapportées aux chlorure de sodium,
$M_{tot}$	[g]	masses des chlorures de sodium et des chlorures de calcium,
$N_{Ct}(C_t)$		paramètre prenant en considération le type de ciment,
$N_{EC}(E/C)$		paramètre prenant en considération la composition du béton,
$N_t(t)$		paramètre prenant en considération l'effet du temps de cure du béton,
$N_T(T)$		paramètre prenant en considération l'effet de la température valant un, car l'effet de la température est négligeable devant la prise en compte dans le paramètre $C_{BET}$ ,
$[N(x)]$		matrice des fonctions d'interpolation,
$P_{atm}$		pression atmosphérique,
$P()$		pourcentage du nombre de fois que $z$ survient par rapport au nombre total de l'échantillon,
$P_{I0}$		caractérise un état de référence arbitraire,
$P_f$		probabilité d'initiation de la corrosion,
$P_v$		pression partielle de vapeur d'eau,
$P_{v0}$		caractérise un état de référence arbitraire,
$Q$		poids associé pour plusieurs paramètres modélisés par une distribution probabiliste,
	$[m^3]$	volume du gaz en transit,
	$[m^3]$	débit d'un liquide,
	$[mol/J]$	énergie d'activation du modèle d'Arrhenius,
$Q_{Cl}$	$[kg/m^2]$	quantité d'ions chlorures transportées par succion capillaire de l'eau,
$Q_{i,j,B}$	$[kg/m^3]$	concentration en ions chlorures capturés par la pâte de ciment rapportée au volume du béton,
$Q_{i,j,T}$	$[kg/m^3]$	concentration en ions chlorures totaux rapportée au volume du béton,
$R$	$[J/mol.^\circ C]$	constante des gaz (8.314510), corrélacion entre un modèle et des mesures de laboratoire, appelée souvent également $R^2$ , résistance à la corrosion du matériau, borne d'intégration droite, coefficient de retard selon le modèle de Lunk,
$R_A$	$[\Omega]$	résistance due à la réaction dans la partie de l'anode,
$R_B$	$[\Omega]$	résistance électrique du béton,
$R_{Cl}$		coefficient de retard,
$RH_{air}$	$[-]$	humidité relative de l'air,
$R_k$	$[\Omega]$	résistance due à la réaction dans la partie de la cathode,
$S$		exposition aux eaux stagnantes, solicitation par les ions chlorures au niveau de l'acier d'armature, degré de saturation des pores capillaires,
$T$	$[^\circ C]$	température,

	[°C]	température du béton,
	[K]	température absolue,
	[K]	température absolue du système,
$T_0$	[°C]	température de base lors de la détermination de Q et de $D_{T_0}$ ,
	[K]	température absolue de référence du modèle d'Arrhénius,
	[°C]	température de référence du modèle d'Arrhénius, valant 20°C,
$T_{air}$	[°C]	température de l'air mesurée par une station météorologique,
$T_i, T_{i-1}$	[°C]	température de l'air à l'instant i respectivement à l'instant i-1,
$T_j$	[K]	température absolue au moment j,
$T_{surf}$	[°C]	température à l'interface air-béton,
$V_m$		capacité de la monocouche,
$V$		volume,
$V_a$	[-]	concentration d'agréats dans le béton,
$V_{Ct}(C_t)$		paramètre prenant en considération le type de ciment,
$V_{EC}(E/C)$		paramètre prenant en considération la composition du béton,
$V_t(t)$		paramètre prenant en considération l'effet du temps de cure du béton,
$V_T(T)$		paramètre prenant en considération l'effet de la température. L'effet de la température est négligeable devant la prise en compte dans le paramètre $C_{BET}$ , ce paramètre vaut donc un,
$W_a$	[kg/m <sup>2</sup> ]	eau totale adsorbée,
$W_b$	[kg]	masse du béton,
$W_e$	[kg]	masse d'eau libre dans les pores.

### Minuscules latines

$a$	[-]	facteur d'absorption de radiation, pour le béton sa valeur est de 0.6 - 0.7, coefficient de diffusion, paramètre obtenu d'une régression linéaire à partir de données expérimentales valant 1.8,
	[mm]	distance dans l'analogie de la poutre simple,
	[mm]	distances de la position du vecteur $B_i$ dans l'analogie de la poutre simple,
$a_1$ à $a_5$		paramètre d'approximation de la fonction erf,
$a_1$	[-]	paramètre pour l'obtention du coefficient de capillarité,
$a_2$	[-]	paramètre pour l'obtention du coefficient de capillarité,
$a_3$	[-]	paramètre pour l'obtention du coefficient de capillarité,
$a_j$		paramètre intermédiaire pour le calcul de la conductivité thermique,
$b$		vecteur et composants de vecteur d'assemblage $n+1 \times 1$ , paramètre obtenu d'une régression linéaire à partir de données expérimentales valant 2.2,
	[mm]	distance dans l'analogie de la poutre simple,
	[mm]	distances de la position du vecteur $B_i$ dans l'analogie de la poutre simple constante,
$c$		coefficient de convection,

	[kg/m <sup>3</sup> ]	concentration en ions chlorures libres rapportée au béton,
c <sub>1</sub>		paramètres du matériau du modèle de désorption du modèle de Roelfstra,
c <sub>11</sub>	[kJ/(m <sup>3</sup> .K)]	capacité calorifique rapporté au volume du béton,
c <sub>2</sub>		paramètres du matériau du modèle de désorption du modèle de Roelfstra,
c <sub>21</sub>	[K <sup>-1</sup> ]	paramètre du transport d'eau du au transfert thermique,
c <sub>3</sub>		paramètres du matériau du modèle de désorption du modèle de Roelfstra,
c <sub>31</sub>		capacité d'emmagasinement des ions chlorures en fonction de la température,
c <sub>32</sub>		capacité d'emmagasinement des ions chlorures en fonction de l'humidité relative,
c <sub>33</sub>		capacité d'emmagasinement des ions chlorures en fonction de la concentration en ions chlorures libres,
c <sub>b</sub>	[kg/m <sup>3</sup> ]	concentration en ions chlorures capturés par la pâte de ciment rapportée au volume de la solution,
	[mol/l]	concentration en ions chlorures liées à la pâte de ciment rapportée à la phase liquide,
c <sub>Cl</sub>	[mol/l]	concentration en ions chlorures dans la phase liquide,
c <sub>CP</sub>	[kJ/(kg.K)]	capacité calorifique du ciment portland,
c <sub>f</sub>	[kg/m <sup>3</sup> ]	concentration en ions chlorures libres rapporté à la solution liquide,
	[kg/m <sup>3</sup> ]	concentration en ions chlorures libres dans les interstices du béton rapportée au volume de la solution,
	[g/g]	concentration en ions chlorures libres dans les interstices du béton rapportée au béton,
c <sub>f,i</sub>	[kg/m <sup>3</sup> ]	concentration des ions chlorures au temps t = 0,
c <sub>f,sa</sub>	[kg/m <sup>3</sup> ]	concentration des ions chlorures, conditions de bord,
c <sub>h</sub>	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	quantité de ciment hydraté rapportée au volume de béton,
c <sub>i</sub>	[kg/m <sup>3</sup> solution]	concentration de l'ion i dans une phase aqueuse,
c <sub>S</sub>	[kJ/(kg.K)]	capacité calorifique des granulats,
c <sub>T</sub>	[kJ/(m <sup>3</sup> .K)]	capacité calorifique rapporté à un mètre cube de béton,
c <sub>t</sub>	[g/g]	concentration en ions chlorures capturés par la pâte de ciment rapportée au béton,
	[mol/l]	concentration en ions chlorures totale rapportée à la phase liquide,
c <sub>w</sub>	[kJ/(kg.K)]	capacité calorifique de l'eau,
d		composants de la matrice d'assemblage,
d <sub>c</sub>	[-]	paramètre du modèle valant 0.5,
d <sub>Cl</sub>	[mm]	déplacement moyen des ions chlorures,
dV	[m <sup>3</sup> ]	volume élémentaire,
e		épaisseur d'enrobage des aciers d'armature,
erf		fonction d'erreur,
f	[-]	teneur en eau, sans unité pour ces équations, rapporté à la masse volumique de l'eau,
		rapport entre l'espacement des fissures et leur ouverture,
f <sub>1</sub>	[mm <sup>2</sup> /s]	facteur tenant compte de la teneur en granulats,

$f_2$		facteur tenant compte du rapport massique de l'eau sur le ciment et du temps de cure du béton,
$f_3$		source interne de formation d'ions chlorures, facteur tenant compte de la température avec la loi d'Arrhénius,
$f_4$		facteur tenant compte de l'humidité relative avec la loi de Bazant,
$f_5$		facteur tenant compte de la concentration en ions chlorures,
$f_D(T_j)$		facteur prenant en compte l'effet de température avec la loi d'Arrhénius,
$f_i$	[%]	teneur en eau, sans unité pour ces équations, rapporté à la masse volumique de l'eau,
$f_S$		fonction probabiliste continue, représentant la sollicitation,
$f_w$	[-]	rapport du volume du film d'eau sur la paroi des pores sur le volume du pore,
$f(x_i)$		facteur prenant en compte l'effet de la profondeur dans le béton d'enrobage,
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	force d'attraction terrestre (9.81), fonction arbitraire dépendant de la position x,
$g_i$		fraction du volume des agrégats par rapport au volume du béton,
$g(t_j)$		facteur prenant en compte l'effet de l'âge du béton,
$h$	[m]	remontée capillaire dans le tube capillaire,
	[-]	humidité relative de l'air, valeur de l'humidité relative au noeud,
$h_{\text{film}}$	[m]	hauteur du film d'eau présente sur la chaussée,
$h_{\text{neige}}$	[mm]	hauteur de neige obtenue par le modèle,
$h_{\text{pluie}}$	[m]	hauteur d'eau précipitée durant l'intervalle de temps débutant par l'épandage de chlorure de sodium jusqu'au temps délimité par i,
	[mm]	hauteur de pluie mesurée dans une station météorologique,
$h_t$		humidité relative limite, valeur limite de l'humidité relative à laquelle le modèle passe d'un polynôme du second degré à un autre polynôme,
$h_y$	[W/m <sup>2</sup> K]	coefficient de transfert thermique, béton : 20,
$k$		paramètre du modèle BET,
$k_{11}$	[W/(m.K)]	conductivité thermique du béton,
$k_{22}$	[m <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion de l'eau liquide ou sous forme de vapeur,
$k_{32}$		coefficient prenant en considération l'entraînement des ions chlorures par l'eau,
$k_{33}$	[m <sup>2</sup> /s]	coefficient de diffusion des ions chlorures dans l'eau,
$k_{\text{ion}}$		paramètre ayant pour valeur 70 <sup>0.5</sup> ,
$l$		nombre total de simulations avec le modèle numérique,
	[m]	profondeur de pénétration du gaz,
	[mm]	longueur d'un élément fini,
	[cm]	épaisseur de l'éprouvette,
$m$		paramètre tenant compte de la composition du béton,
$m_1$		rapport des masses molaires des ions chlorures et des chlorure de sodium,
$m_2$		rapport des masses molaires des ions chlorures et des chlorure de calcium,

$m_{CaCl_2}$	[g/mol]	masses molaires des chlorures de calcium,
$m_{Cl}$	[g/mol]	masses molaires des ions chlorures,
$m_{Cl_2}$	[g/mol]	masses molaires de deux ions chlorures,
$m_{NaCl}$	[g/mol]	masses molaires des chlorures de sodium,
$n$		nombre de paramètres modélisés par une distribution probabiliste, nombre de paramètres d'input, paramètre de l'approximation de Galerkin de la fonction d'interpolation, nombre de couches à l'état de saturation, nombre l'éléments finis,
$n_0$		paramètre provenant de l'ajustement avec des essais en laboratoire,
$n_h$	[jours/an]	nombre de jours hivernaux due à la rigueur de l'hiver,
$n_{int}$		nombre d'interventions annuelles moyennes d'épandage de chlorure de sodium,
$p$	[N/m <sup>2</sup> ]	pression à laquelle le volume du gaz en transit est mesuré, paramètre d'approximation de la fonction erf,
$p_1$	[N/m <sup>2</sup> ]	pression du gaz entrant,
$p_2$	[N/m <sup>2</sup> ]	pression du gaz sortant,
$p_{atm}$	[N/m <sup>2</sup> ]	pression de l'air environnante,
$pH$		valeur du pH dans la zone de transition,
$p_m$	[m <sup>3</sup> /s]	pression motrice due aux forces capillaires,
$p_v$		pression partielle de vapeur d'eau,
$p_{v,s}$		pression partielle de vapeur d'eau saturante,
$p_w$	[N/m <sup>2</sup> ]	pression de l'eau,
$q$	[m <sup>3</sup> ]	quantité de gaz,
	[mm/s]	flux ou vitesse de l'eau,
$q_{NaCl}$	[kg/m <sup>2</sup> ]	quantité surfacique moyenne annuelle d'épandage de chlorures de sodium,
	[g/m <sup>2</sup> ]	quantité surfacique d'épandage de chlorures de sodium,
$r$	[m]	rayon du tube capillaire,
$r_{C_2S}$	[mole/s.m <sup>3</sup> béton]	taux de réaction des silicates de dicalcium,
$r_{C_3S}$	[mole/s.m <sup>3</sup> béton]	taux de réaction des silicates de tricalcium,
$r_{CH}$	[mole/s.m <sup>3</sup> béton]	taux de réaction du gaz carbonique avec la portlandite,
$r_{CSH}$	[mole/s.m <sup>3</sup> béton]	taux de réaction moyen des silicates de tricalcium et dicalcium pour former des silicates de calcium hydraté,
$r_D$	[mole/s.m <sup>3</sup> béton]	taux de dissolution de la portlandite sous forme aqueuse,
$r_{H,C_2S}$	[mole/s.m <sup>3</sup> béton]	taux de réaction par l'hydratation du ciment pour former des silicates de dicalcium,
$r_{H,C_3S}$	[mole/s.m <sup>3</sup> béton]	taux de réaction par l'hydratation du ciment pour former des silicates de tricalcium,
$r_{H,C_3A}$	[mole/s.m <sup>3</sup> béton]	taux de réaction par l'hydratation du ciment par l'aluminate de tricalcium,
$r_{H,C_4AF,S}$	[mole/s.m <sup>3</sup> béton]	taux de réaction par l'hydratation du ciment par l'aluminoferrite de calcium,

$r_{H,C4AF}$	[mole/s.m <sup>3</sup> béton]	taux de réaction par l'hydratation du ciment par la consommation du gypse,
$r_{H,CH}$	[mole/s.m <sup>3</sup> béton]	taux de réaction par l'hydratation du ciment pour former de la portlandite,
$r_{H,CSH}$	[mole/s.m <sup>3</sup> béton]	taux de réaction moyen par l'hydratation du ciment pour former des silicates de tricalcium et dicalcium,
$r_k$		rayon de Kelvin,
$s$		paramètre de la loi normale, représentant l'écart-type,
$s^2$		variance d'un échantillon,
$sm$		paramètre de la loi lognormale,
$sp$		paramètre de la loi lognormale,
$t$	[h] [s]	intervalle de temps,
	[s]	temps depuis le contact de l'eau liquide à la surface du béton,
	[jours]	période de cure du béton,
	[s] [an]	temps,
$t_0$	[jours]	temps de cure du béton,
$t_c$		coefficient du modèle de capillarité, valant 0.97 après calibration avec les essais,
$t_D$	[s]	âge du béton lorsque le coefficient de diffusion devient constant,
$t_j$	[s]	âge du béton au moment j,
$u$	[m <sup>2</sup> /sV]	mobilité des ions,
	[m/s]	vecteur simulant la vitesse de l'eau dans les pores du béton,
$u_k$		mobilité effective,
$v$		vecteur représentant les quantités des différentes substances modélisées, scalaire représentant une concentration ou une quantité comme la température, la quantité d'eau, etc.,
	[m/s]	vitesse du liquide,
$var[x]$		variance d'un échantillon x,
$v_{Cl}$	[m/s]	vitesse moyenne des ions chlorures,
$v_{corr}$	[mm/an]	vitesse de corrosion,
$v_o$	[m/s]	vitesse initiale d'une gouttelette d'eau projetée latéralement par le passage d'un véhicule sur une chaussée humide,
$v_{sl}$		volume spécifique de l'eau liquide,
$v_v$	[km/h]	vitesse moyenne des véhicules sur un tronçon de route,
$w$		vecteur représentant de la variation spatiale des différentes substances modélisées,
	[kg/m <sup>3</sup> béton]	teneur en eau du béton,
	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	teneur en eau rapportée au volume du béton,
$w_c$	[g/g]	teneur en eau dans la pâte de ciment,
$w_{i,j}$	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	teneur en eau rapportée au volume du béton,
$w_{sat}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	teneur en eau, à l'état saturé, rapportée au volume de béton,

$w_t$	[kg/m <sup>3</sup> ]	teneur en eau rapportée au volume du béton, résultat de la simulation au temps $t$ ,
$w_{t-1}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	teneur en eau rapportée au volume du béton, résultat de la simulation au temps $t-1$ ,
$w_{t,final}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	teneur en eau rapportée au volume du béton de transition,
$x$	[mm]	profondeur ou distance dans le béton d'enrobage, paramètres d'entrée du modèle numérique, position de la transformation d'une loi probabiliste continue en distribution discrète, position dans le béton, point considéré sur R et S,
	[m]	longueur de pénétration d'un liquide,
	[m]	distance,
	[mm]	pénétration de l'attaque par corrosion, échantillon, variable,
$x_c$	[mm]	profondeur de carbonatation dans le béton d'enrobage,
$x_{Cl}$	[m]	profondeur du front de pénétration des ions chlorures,
$x_i$	[m]	distance dans le béton d'enrobage,
$x_{ji}$		paramètre d'input du modèle numérique,
$x_L, x_R$		bornes de l'intégration, en l'occurrence position d'un élément fini,
$x_s$	[m]	épaisseur du béton d'enrobage,
$x_t$	[m]	distance transversale à une voie de circulation depuis le bord de la chaussée,
$x_w$	[m]	profondeur du front de pénétration de l'eau,
$y$	[m]	distance verticale correspondant au gabarit de projection de gouttelettes, résultats des simulations,
$y_{CO2}$	[-]	concentration volumique de gaz carbonique dans l'air,
$y_k$		paramètre résultat d'output du modèle numérique,
$z$		vecteur prenant en considération la carbonatation, nombre de valence de l'ion chlorure,
$z_i$		nombre de valence de l'ion $i$ ,
$z_{max,j}$		paramètre de données des stations météorologiques se situant sur un extremum positif local,
$z_{min,j}$		paramètre de données des stations météorologiques se situant sur un extremum négatif local,
$z_p$		paramètre de position, permettant d'obtenir le signe positif ou négatif du modèle.

### Symboles grecs

$\alpha$	[°]	angle initial par rapport à l'horizon de la direction prise par une gouttelette projetée par le passage d'un véhicule sur une chaussée humide, paramètre d'optimisation pour le modèle, permettant d'obtenir la position de $z_p$ ,
	[-]	degré d'hydratation du béton, facteurs de l'isotherme de Langmuir reliant la concentration d'ions chlorures



		liées au ions chlorures libres, facteurs de l'isotherme de Freundlich reliant la concentration d'ions chlorures liées au ions chlorures libres, paramètre de l'isotherme de l'adsorption des ions chlorures par la pâte de ciment du modèle de Maruya,
	[°C <sup>-1</sup> ]	énergie d'activation du modèle, valant 0.026, coefficient dépendant du type d'attaque, pour une corrosion généralisée $\alpha = 2$ , pour une attaque par piqure $\alpha < 4$ à 8,
$\alpha_0$		coefficient du modèle de Bazant,
$\alpha_c$		coefficient du modèle de capillarité, valant 0.09 après calibration avec les essais,
$\alpha_{OH}$	[°C]	énergie d'activation du modèle, valant 0.56,
$\beta$	[kg/m <sup>3</sup> ]	facteur reliant la concentration d'ions chlorures liées aux ions chlorures libres rapportés au volume de la solution, facteurs de l'isotherme de Freundlich reliant la concentration d'ions chlorures liées au ions chlorures libres,
$\Gamma_i$		quantité adsorbée par réaction chimique,
$\gamma$	[°C ou %] [J/m <sup>2</sup> ]	paramètre de la fonction homographique, tension superficielle, coefficient d'activité, coefficient d'activité dans la solution cathodique, facteur reliant la concentration d'ions chlorures liées au ions chlorures libres, facteur reliant la concentration d'ions chlorures liées aux ions chlorures libres, constante valant 0.6, facteurs de l'isotherme de Langmuir reliant la concentration d'ions chlorures liées au ions chlorures libres, facteurs de l'isotherme de Freundlich reliant la concentration d'ions chlorures liées au ions chlorures libres, coefficient de dissymétrie de Pearson,
$\gamma_i$		coefficient d'activité chimique,
$\gamma_L$	[J/m <sup>2</sup> ]	tension superficielle de l'eau liquide,
$\Delta c$	[kg/m <sup>3</sup> ]	concentration en ions chlorures libres supplémentaire durant un intervalle de temps $\Delta t$ rapportée au béton,
$\Delta \epsilon_H$	[-]	réduction de la porosité due à l'hydratation du ciment,
$\Delta \epsilon_c$	[-]	réduction de la porosité due à la carbonatation du ciment,
$\Delta \Phi$	[V]	voltage effectif appliqué,
$\Delta p$	[N/m <sup>2</sup> ]	différence de pression du gaz,
$\Delta T_{\text{capteur}}$	[°C]	différence de température de l'air mesurée avec un capteur,
$\Delta T_{\text{meteo}}$	[°C]	différence de température de l'air mesurée avec une station météorologique,
$\Delta Hr_{\text{capteur}}$	[%]	différence d'humidité relative dans l'air mesurée avec un capteur,
$\Delta Hr_{\text{meteo}}$	[%]	différence d'humidité relative dans l'air mesurée avec une station météorolo- gique,
$\Delta t$		intervalle de temps,
	[s]	intervalle de temps utilisé dans TransChlor,
	[s]	portion de temps discrétisée par la méthode des différences finies,

$\Delta u$	[V]	différence de potentiel électrique,
$\Delta x$	[m]	portion d'espace discrétisée par la méthode des différences finies,
$\Delta z$		intervalle entre deux extrema locaux,
$\varepsilon$	[-]	volume des pores sur le volume total du béton, erreur admise avec l'intégration de Simpson,
$\varepsilon_{ini}$	[-]	porosité initiale avant les effets de l'hydratation et de la carbonatation,
$\eta$	[Ns/m <sup>2</sup> ]	viscosité d'un gaz ou d'un liquide,
$\theta$		paramètre du modèle définissant une modélisation explicite ou implicite,
	[°]	angle de contact,
$\kappa$	[m <sup>2</sup> /s]	conductivité des ions chlorures à l'état de saturation,
$\lambda$	[J/mol]	énergie d'activation du modèle d'Arrhénius, paramètre de la loi probabiliste lognormale,
$\lambda_T$	[W/(m.K)]	conductivité thermique du béton,
$\mu$	[J/mol]	potentiel chimique,
	[l/g]	paramètre de conversion d'unité en gramme d'ions chlorures par gramme de béton, paramètre de la loi probabiliste normale, appelé moyenne,
$\mu_0$	[J/mol]	potentiel chimique initial,
$\mu_{10}$		caractérise un état de référence arbitraire,
$\xi$		coordonnée naturelle, paramètre de la loi probabiliste lognormale,
$\xi_1$		paramètre de l'isotherme de Langmuir,
$\xi_2$		paramètre de l'isotherme de Langmuir,
$\rho$	[kΩcm]	résistivité électrique, déterminé par l'essai Wenner,
$\rho_{air,s}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	masse volumique de la vapeur d'eau saturante,
$\rho_C$	[kg/m <sup>3</sup> ]	masse volumique du ciment,
$\rho_D$	[kg/m <sup>3</sup> ]	masse volumique de l'ajout, par exemple un fluidifiant,
$\rho_e$	[kg/m <sup>3</sup> ]	masse volumique de la vapeur d'eau,
$\rho_G$	[kg/m <sup>3</sup> ]	masse volumique des granulats,
$\rho_{neige}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	masse volumique de la neige,
$\rho_w$	[kg/m <sup>3</sup> ]	masse volumique de l'eau,
$\sigma$		paramètre de la loi probabiliste normale, appelé écart-type,
$\phi$	[V]	champ électrique,
	[mm]	diamètre résiduel après attaque par corrosion,
$\phi_0$	[mm]	diamètre initiale de la barre d'armature,
$\varphi$		valeur local du potentiel électrique,
$\Psi$		potentiel de diffusion,
$\Omega$	[-]	paramètre permettant de quantifier le taux d'hydratation, facteur de tortuosité, valant $(\pi/2)^2$ ,
$\partial c_F / \partial c_t$		capacité d'adsorption des ions chlorures par la pâte de ciment,
$\partial w / \partial H$		capacité d'adsorption de la vapeur d'eau dans les pores du béton,

$\partial H/\partial t$  variation temporelle de l'humidité relative dans les pores du béton.

### Exposants

$\beta$	exposant constant pour la prise en compte de l'effet de la peau du béton, exposant et paramètre de l'isotherme de Freundlich,
$\gamma$	exposant constant pour la prise en compte de l'effet de l'âge du béton,
$m$	exposant ayant pour valeur 1/2,
$n$	coefficient du modèle de Bazant,
$s$	variable d'une fonction exponentielle,
$t$	exposant, nombre entier positif.

### Indices

0	indice indiquant le stade initial,
1	indice indiquant la cathode,
1, 2, 3	indices,
1,2	position de la distance $x$ ou du poids $F$ ,
A	indice indiquant l'anode,
a	indice signifiant adsorbé, indice signifiant agrégats,
air	indice relatant l'atmosphère environnante,
atm	indice relatant l'atmosphère,
B	indice indiquant le gaz carbonique, indice indiquant les ions chlorures liés, indice indiquant le béton,
b	indice indiquant le béton, indice indiquant les ions chlorures liés à la pâte de ciment, indice indiquant la température,
BET	indice relatant l'appartenance au modèle BET,
c	indice relatant la carbonatation, indice signifiant capillarité, indice signifiant béton, indice signifiant fissure, indice,
C	indice relatant la pâte de ciment,
C2S	indice relatant le silicate de dicalcium,
C3S	indice relatant le silicate de tricalcium,
C3A	indice relatant l'aluminate de tricalcium,
C4AF,S	indice relatant l'aluminoferrite de calcium,
C4AF	indice relatant le gypse,
CaCl <sub>2</sub>	indice relatant les chlorures de calcium,
capteur	indice relatant les données d'un capteur,
CH	indice relatant la portlandite carbonaté,
Cl	indice relatant le chlore,
Cl <sub>2</sub>	indice relatant la molécule composée de deux atomes de chlore,

CSH	indice relatant le silicate de calcium hydraté,
corr	indice signifiant valeur corrigée, indice signifiant corrosion,
CO <sub>2</sub>	indice relatant le gaz carbonique,
CP	indice relatant le ciment portland,
Ct	indice indiquant la prise en compte du type de ciment,
D	indice relatant un ajout d'un adjuvant dans le béton, indice relatant de la portlandite sous forme aqueuse, indice relatant la température, indice relatant l'épandeuse,
e	indice relatant l'eau ou l'eau libre, indice indiquant effectif,
EC	indice indiquant la prise en compte du rapport massique de l'eau sur le ciment,
eq	indice signifiant la transformation de l'effet des chlorures de calcium en chlorure de sodium,
ext	indice relatant l'atmosphère environnante, indice, indiquant d'une concentration ou un taux d'humidité ou de gaz carbonique contenue dans l'atmosphère,
F	indice indiquant ions chlorures libres,
f	indice indiquant ions chlorures libres, indice indiquant l'occurrence,
film	indice relatant un film d'eau sur une chaussée,
final	indice indiquant la valeur finale retenue,
FS	indice signifiant fumée de silice,
g	indice relatant le gaz,
G	indice relatant les granulats, indice indiquant le matériau à l'état gazeux,
h	indice relatant la période hivernale, indice signifiant hydraté,
H	indice relatant l'hydratation,
i	indice de position dans le béton, indice de position de la profondeur dans le béton d'enrobage, indice de position de la variable x, numéro du paramètre d'input, position dans l'échantillon du paramètre modélisé par une distribution probabiliste [1,n], position des composants de la matrice d'assemblage, indice indiquant t = 0, indice indiquant agrégat,
i, j	indices tensoriels,
i, i-1	indice indiquant la position temporelle i ou i-1,
ini	indice indiquant le stade initial, indice, indiquant une concentration avant carbonatation de la pâte de ciment,
int	indice relatant les interventions,
ion	indice indiquant ion,

j	indice indiquant la position dans l'espace d'un extremum, indice des paramètres, numéro de la position des paramètres d'input, associé au poids $F_j$ ,
k	numéro de la simulation avec le modèle numérique, indice indiquant Kelvin, indice indiquant effectif, indice de position dans le temps, indice indiquant la cathode,
l	nombre total de simulations avec le modèle numérique, indice indiquant l'état liquide,
L	indice indiquant l'état liquide,
m	indice indiquant le mot motrice, indice indiquant l'occupation d'une monocouche des molécules, indice indiquant moyen, indice indiquant matrice du ciment, indice indiquant béton sain,
météo	indice relatant les données d'une station météorologique,
max	indice indiquant la position d'un maximum d'une fonction,
min	indice indiquant la position d'un minimum d'une fonction,
n	nombre de paramètres d'input, nombre d'éléments finis,
NaCl	indice relatant les chlorures de sodium,
neige	indice relatant les précipitations nivales,
o	indice,
OH	indice indiquant l'état de passivation du béton,
p	indice indiquant la position d'un point particulier, indice signifiant la pâte de ciment,
pluie	indice relatant les précipitations des précipitations,
R	indice indiquant la résistance,
S	indice indiquant la sollicitation,
s	indice indiquant l'état de saturation, indice indiquant le mot spécifique, indice,
S	indice indiquant le matériau à l'état solide,
s	indice signifiant béton d'enrobage,
sa	indice indiquant les conditions de bord,
sat	indice indiquant l'état de saturation,
sol	indice relatant le soleil,
surf	indice relatant une position à l'interface air-béton,
t	indice indiquant le temps de cure, indice relatant le temps, indice, indice relatant une direction transversale, indice indiquant total,

t-1	indice relatant le temps au pas de temps précédent d'un calcul,
T	indice relatant la température,
T <sub>0</sub>	indice indiquant la température initiale,
tot	indice signifiant la prise des chlorures de calcium et de sodium,
v	indice relatant un véhicule, indice relatant la vapeur d'eau,
w	indice relatant l'eau,
y	indice.

### Formulations chimiques

CaCl <sub>2</sub>	chlorure de calcium,
Ca(OH) <sub>2</sub>	formule chimique de la portlandite, produit de réaction après l'hydratation du ciment,
[Ca(OH) <sub>2</sub> ]	la portlandite carbonaté,
[Ca(OH) <sub>2</sub> (s)] [mol/m <sup>3</sup> béton]	concentration molaire de la portlandite non dissoute,
[Ca(OH) <sub>2</sub> (aq)] [mol/m <sup>3</sup> béton]	concentration molaire de la portlandite sous forme aqueuse,
CaCO <sub>3</sub>	formule chimique du carbonate de calcium,
[3CaO.CaCl <sub>2</sub> .Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .10H <sub>2</sub> O]	le sel de Friedel,
[3CaO.3CaSO <sub>4</sub> .Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .12H <sub>2</sub> O]	le monosulfoaluminate,
[3CaO.3CaSO <sub>4</sub> .Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .32H <sub>2</sub> O]	l'ettringite,
2CaO.SiO <sub>2</sub>	formule chimique du silicate de dicalcium, appelée également C <sub>2</sub> S,
3CaO.SiO <sub>2</sub>	formule chimique du silicate de tricalcium, appelée également C <sub>3</sub> S,
3CaO.2SiO <sub>2</sub> .3H <sub>2</sub> O	formule chimique du silicate de calcium hydraté, appelée également CSH,
[CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O]	le gypse,
CO <sub>2</sub>	formule chimique du gaz carbonique,
[CO <sub>2</sub> ] [mol/m <sup>3</sup> air]	concentration molaire du gaz carbonique,
H <sub>2</sub> O	formule chimique de l'eau,
[K <sub>2</sub> Ca(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O]	la syngénite,
[Mg(OH) <sub>2</sub> ]	la brucite,
[NaCl]	la halite ou chlorure de sodium,
[Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10H <sub>2</sub> O]	la mirabilite.

## 7 Bibliographie

- [Ababneh02a] **Ababneh A. N., Benboudjema F., Xi Y.**, *Chloride penetration in non saturated concrete*, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, pp 183 - 191, **2003**.
- [Abramowitz72] **Abramowitz M., Stegun I.A.**, *Handbook of mathematical functions : with formulas, graphs and mathematical tables*, Error Function and Fresnel Integrals, Part 7, pp 297-329, **1972**.
- [Akinfiyev01] **Akinfiyev N. N., Mironenki M. V., Grant S. A.**, *Thermodynamic Properties of NaCl Solutions at Subzero Temperatures*, Journal of Solution Chemistry, Vol. 30, No. 12, pp 1065 - 1080, December, **2001**.
- [Amey98] **Amey Stephen L., Johnson Dwayne A., Miltenberger Matthew A., Farzam Hamid**, *Predicting the service life of concrete marine structures ; An environmental methodology*, ACI Structural Journal, 95, 205-214, Miami, USA, mars - avril, **1998**.
- [Amrein86] **Amrein E.**, *Feuchteaufnahme und Feuchtetransport durch poröse Baustoffe*, Element 26, 26, pp 9 - 18, Luzern, Suisse, **1986**.
- [Andrade99] **Andrade C., Sarría J., Alonso C.**, *Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering*, Cement and Concrete Research, 29, pp 1249 - 1259, Madrid, Espagne, Juin, **1999**.
- [Andrade02] **Andrade C., Alonso C., Sarría J.**, *Corrosion rate evolution in concrete structures exposed to the atmosphere*, cement and concrete composite, 24, 55 - 64, U.K., **2002**.
- [Ang75] **Ang A.-H.-S., Tang W.-H.**, *Probability concept in engineering and design, basic principles*, John Wiley & Sons, 1, 409 p., Illinois, Canada, **1975**.
- [Ang84] **Ang A.-H.-S., Tang W.-H.**, *Probability concepts in engineering planning and design, decision, risk and reliability*, John Wiley & Sons, 2, 562 p., Illinois, Canada, **1984**.
- [Anita98] **Anita**, *Essai et évaluation d'autres méthodes et matériaux de dégivrage en Suède*, Xème Congrès International de la Viabilité Hivernale de l'AIPCR, Volume 2, pp 289 - 302, Linköping, Suède, mars, **1998**.
- [Astro04] <http://www.astro-service.ch>.
- [Audergon00] **Audergon L.**, *Maintenance des ouvrages et infrastructures. Armature revêtue ou en acier inoxydable dans le béton armé - Etude de faisabilité*, EPFL - DGC - MCS, 69, Lausanne, Suisse, **2000**.
- [Audergon00a] **Audergon L.**, *Monitoring in situ interprétation des paramètres de corrosion d'ouvrages réels en béton armé*, EPFL - DGC - MCS, Travail de diplôme, 189, Lausanne, Suisse, **2000**.
- [Ayano00] **Ayano T., Sakata K., Wittmann F. H.**, *Moisture distribution, diffusion coefficient, and shrinkage of cement-based materials*, Concrete library of JSCE, No 36, pp 207 - 226, December, **2000**.
- [Bailey99] **Bailey S. F.**, *Modélisation des actions sur les structures*, cours postgrade risque et sécurité, module V3, **1999**.
- [Balasubramaniam98] **Balasubramaniam R.**, *The corrosion resistant Delhi Iron Pillar*, [http://www.iitk.ac.in/infocell/Archive/dirnov1/iron\\_pillar.html](http://www.iitk.ac.in/infocell/Archive/dirnov1/iron_pillar.html), Volume 1, n°3, 5 p., Kanpur, Inde, **1998**.
- [Bamforth94] **Bamforth P. B., Chapman-Andrews J. F.**, *Corrosion and corrosion Protection of Steel Concrete* (ed. R. N. Swamy), Sheffield Academic Press, Vol 1, p. 139, Sheffield, **1994**.
- [Barbarulo00] **Barbarulo R., Marchand J., Snyder K. A., Prené S.**, *Dimensional analysis of ionic transport problem in hydrated cement systems, Part I Theoretical considerations*, Cement and Concrete Research, 30, p. 1955-1960, **2000**.
- [Barbe85] **Barbe H. B.**, *Uster und die Grenzen der Verantwortlichkeit ?*, Schweizer Ingenieur und Architekten, n° 25, pp 627, **1985**.

[Baroghel\_Bouny94] **Baroghel-Bouny V.**, *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons*, LCPC et ministère de l'équipement des transports et du tourisme, 468, Paris, France, **1994**.

[BaroghelBouny97] **Baroghel-Bouny V., Perrin B., Chemloul L.**, *Détermination expérimentale des propriétés hydriques des pâtes de ciment durcies - Mise en évidence des phénomènes d'hystérésis*, Materials and Structures, Vol. 30, pp 340-348, France, July, **1997**.

[Bazant71] **Bazant Z., Najjar L. J.**, *Drying of Concrete as a Nonlinear Diffusion Problem*, Cement and Concrete Research, Vol. 1, pp 461-473, USA, **1971**.

[Bazant86] **Bazant Z.**, *Creep and shrinkage of concrete : mathematical modelling*, RILEM, 10, Illinois, Etats-Unis, août, **1986**.

[Bensted83] **Bensted J.**, *Hydration of Portland Cement*, Advances in Cement Technology, S.N. Ghosh, ed., Pergamon Press, New York, Etats-Unis, **1983**.

[Bentz00] **Bentz D. P., Feng X., Hooton R. D.**, *Time-Dependent diffusivities : possible misinterpretation due to spatial dependence*, RILEM, proceeding PRO 19, edited by C. Andrade and J. Kropp, Pro19, 10, USA, septembre, **2000**.

[Bentz00a] **Bentz D. P.**, *Influence of silica fume on diffusivity in cement-based materials. II Multi-scale modeling of concrete diffusivity*, Cement and Concrete Research, Pergamon, 30, 1121-1129, Gaithersburg, U.S.A., **2000**.

[Bjegovic03] **Bjegovic D., Mikulic D., Pause Z.**, *Calculation of Corrosion Limit State Safety Factor by Application of Fuzzy Set Theory*, Sixth Canmet international conference, supplementary paper, 573 - 586, Thessaloniki, Greece, **2003**.

[Blaser05] discussion avec M. **Olivier Blaser**, service des Routes Nationales du canton de Vaud.

[Blomqvist98] **Blomqvist G., Johansson E.-L.**, *Facteurs déterminant la dispersion par voie aérienne des polluants à partir des routes*, Xème Congrès International de la Viabilité hivernale de l'AIPCR, Volume 2, pp 477 - 485, Linköping, Suède, **1998**.

[Blomqvist01] **Blomqvist G.**, *De-icing salt and the roadside environment*, Net, 32 p., Stockholm, Suède, **2001**.

[Böhni91] **Böhni H., Flückiger D., Hächler A.**, *Schutz und Sanierung von Stahlbetonbauwerken im Bereich von Strassen*, Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Strassenbau, 212, 158 p., 1991.

[Bolognesi02] **Bolognesi R.**, *La neige, connaître et observer la neige pour mieux prévoir les avalanches*, Nathan, 63 p., Paris, France, **2002**.

[Borgeat04] *Photos et relevés topographiques effectués par le bureau Lonfat-Borgeat SA, 1920 Martigny, mandat dirigé par monsieur Meinrad Coppey, voyer d'arrondissement*, **2004**.

[Bornand98] **Bornand E.**, *Physical bases of freezing point measurement using active and passive probes*, Rapport interne Boschung, Proceedings of the 9th SIRWEC Conference, 14, **1998**.

[Boschung96] **Boschung**, *Thermoroute de l'autoroute de contournement de Lausanne*, rapport interne Boschung, 8 p., Suisse, mai, **1996**.

[Boschung98A] **Zambelli M., Beauverd J., Bühler T., Boschung M.**, *L'autoroute A9, contournement de Lausanne, dotée d'un système d'aspersion de saumure combiné avec un enrobé drainant*, rapport interne Boschung, 10 p., Suisse, janvier, **1998**.

[Boschung00E] **Boschung**, *Water film thickness measurement road surfaces by means of an early ice warning sensor*, Rapport interne Boschung, 7 p., Granges-Paccot, Suisse, mars, **2000**.

[Boschung02] **Boschung**, *Capteurs*, rapport interne Boschung, 40 p., Suisse, **2002**.

[Breit97] **Breit W.**, *Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt*, ibac, Teil1 : Allgemeines, Kurzbericht Nr 68, RWTH Aachen.



- [Breit98] **Breit W.**, *Critical corrosion inducing chloride content- State of the art (Part 1)*, Beton-technische Berichte, 442-449, Düsseldorf, Allemagne, **1998**.
- [Brod92] **Brod H.-G.**, *Langzeitwirkung von Streusalz (NaCl) auf die Umwelt*, Fp, 9.9125, 258 p., Nienburg, Suisse, juillet, **1992**.
- [Broomfield00] **Broomfield J. P.**, *The Use of Permanent Corrosion Monitoring in New and Existing Reinforced Concrete Structures*, [www.aguide.net/scripts/technology/profile/index.cfm?l=19&h=195.html](http://www.aguide.net/scripts/technology/profile/index.cfm?l=19&h=195.html), Angleterre, **2000**.
- [Bruehwiler01] **Brühwiler E., Denarié E., Conciatori D.**, *Simulation of the corrosion behaviour of concrete elements reinforced with high performance steel*, FIB -Symposium, paper B3-3, Berlin, Allemagne, Octobre, **2001**.
- [Bruehwiler03] **Brühwiler E., Denarié E., Conciatori D.**, *Anwendungspotential von korrosionsresistenten Betonstaehlen Schlussbericht*, 14 p., Lausanne, Suisse, janvier, **2003**.
- [Bruehwiler04] **Brühwiler E.**, *Maintenance des ouvrages*, Cours EPFL, Lausanne, Suisse, **2004**.
- [Bruehwiler05] **Brühwiler E., Denarié E., Waelchli T., Maitre M., Conciatori D.**, *Dauerhafte Kunstbauten bei geringem Unterhalt (Ouvrages d'art durables à entretien minimal)*, OFR, Swiss Federal Roads Authority, Swiss Association of Road and Transportation Experts, final draft, 2000/173 (88/00), 122 p., Lausanne, Suisse, Dezember, **2005**.
- [Brunauer64] **Brunauer S., Copeland L. E.**, *The Chemistry of Concrete*, Scientific American, 210 (4), 80, **1964**.
- [Buchwald00] **Buchwald A.**, *Ionentransportprozesse zur Verminderung von Schadssalzgehalten in porösen, feuchten Mauerwerksbaustoffen*, Thèse de doctorat, Bauhaus-Universität Weimar, 133, Weimar, Allemagne, novembre, **2000**.
- [Buenfeld98] **Buenfeld N. R., Okundi E.**, *Effect of cement content on transport in concrete*, Magazine of Concrete Research, Vol 50 N°4, pp 339 - 351, **1998**.
- [Byfors87] **Byfors K.**, *Influence of silica fume and fly ash on chloride diffusion and pH values in cement paste*, Cement and Concrete Research, 17, N° 1, pp 115 - 130, **1987**.
- [Callanan03] **Callanan T., Richardson M.**, *Modelling Chloride Ingress in Concrete : A Comparative Study of Laboratory and Field Experience*, Sixth Canmet/ACI international conference, 1, 389 - 408, Thessaloniki, Greece, **2003**.
- [Caron95] **Caron J. M., Gauthier A., Schaaf A., Ulysse J., Wozniak J.**, *Comprendre et enseigner la planète Terre*, Ophrys, Troisième édition, 271 p., Paris, France, **1995**.
- [Castellote99] **Castellote M., Andrade C., Alonso C.**, *Chloride-binding isotherms in concrete submitted to non-steady-state migration experiments*, Cement and Concrete Research, Pergamon, 29, 1799-1806, Madrid, Espagne, **1999**.
- [Castellote00] **Castellote M., Andrade C., Alonso C.**, *Phenomenological mass-balance-based model of migration tests in stationary conditions. Application to non-steady-state tests*, Cement and Concrete Research, Pergamon, 30, 1885-1893, Madrid, Spain, **2000**.
- [Castellote00a] **Castellote M., Andrade C., Alonso C.**, *Electrochemical removal of chlorides modelling of the extraction, resulting profiles and determination of the efficient time of treatment*, cement and concrete research, 30, 615 - 621, Madrid, Spain, January, **2000**.
- [Castellote01] **Castellote M., Andrade C., Alonso C.**, *Measurement of the steady and non-steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber. Comparison with natural diffusion tests*, Cement and Concrete Research, Pergamon, 31, 1411-1420, Madrid, Spain, **2001**.
- [Castro01] **Castro P., De Rincon O. T., Pazini E. J.**, *Interpretation of chloride profiles from concrete exposed to tropical marine environments*, Cement and Concrete Research, Pergamon, 31, 529-537, Mérida, Mexique, **2001**.

[Cauwelaert85] **Cauwelaert F., Bourdeau P. L., Perwez A.**, *Approximations ponctuelles des distributions de probabilité par la méthode de Rosenblueth. Application à l'estimation du risque de rupture d'un bajeur d'écluse*, EPFL - ENAC - LMS, N° 110, pp 457-470, Lausanne, Switzerland, **1985**.

[Cert04] mise à disposition de plans de l'encorbellement de Champlan à Sion par l'intermédiaire de monsieur L. Polano du bureau **Léger Cert SA**.

[Charron04] **Charron J-P., Denarié E., Brühwiler E.**, *Permeability of UHPFRC under high stresses*, Proc., Advances in Concrete Through Science and Engineering, (CD-ROM), RILEM, Evanston, IL, **2004**.

[Chatterji95] **Chatterji S.**, *On the applicability of Fick's second law to chlorid'ion migration through Portland cement concrete*, Cement and Concrete Research, 25, 299-303, **1995**.

[Chaussadent99] **Chaussadent T.**, *Etat des lieux et réflexions sur la carbonatation du béton armé*, LCPC, Paris, France, septembre, **1999**.

[Chaussadent00] **Chaussadent T.**, *Limitation de la pénétration des chlorures par les aluminates du ciment*, Actes des journées scientifiques du LCPC, pp 31 - 35, Bordeaux, France, mars, **2000**.

[Climent02] **Climent M. A., De Vera G., Lopez J. F., Viqueira E., Andrade C.**, *A test for measuring chloride diffusion coefficients through non saturated concrete. Part 1 : The instantaneous plane source diffusion case*, cement and concrete research, 32, 1113 - 1123, Spain, January, **2002**.

[Colleparidi82] **Colleparidi M., Biagini S.**, *Effect of water/cement ratio, pozzolanic addition and curing time on chloride penetration into concrete*, 8 p., Ancona, Italie, **1982**.

[Conciatori02] **Conciatori D., Brühwiler E., Denarié E.**, *Influence of microclimate on the probability of initiation of chloride induced corrosion in reinforced concrete*, Phd - Symposium, Lausanne, Suisse, **2002**.

[Conciatori02a] **Conciatori D.**, *Modélisation probabiliste de l'initiation de la corrosion induite par les chlorures, dans le béton armé*, EPFL - ENAC - IS - MCS, 16 p., Lausanne, Suisse, juin, **2002**.

[Conciatori03] **Conciatori D., Denarié E.**, *Mesures d'humidité et de température dans les caissons du Pont sur la Dénève*, MCS, RAPPORT D'ESSAIS N° MCS 02.12.6-1, Lausanne, Suisse, août, **2003**.

[Conciatori05] **Conciatori D., Brühwiler E., Gysler R., Denarié E.**, *Essai de capillarité à basses températures appliqué à des bétons de différentes perméabilités*, Rapport interne MCS, 84 p., Lausanne, Suisse, Juin, **2005**.

[Costa02] **Costa A., Appleton J.**, *Case study of concrete deterioration in a marine environment in Portugal*, cement and concrete composite, 24, 169 - 179, Lisbon, Portugal, **2002**.

[Courard99] **Courard L.**, *Contribution à l'analyse des paramètres influençant la création de l'interface entre un béton et un système de réparation*, Université de Liège, 192, 198 p., Liège, Belgique, **1999**.

[Cusson04] **Cusson D., Isgor B.**, *Durability of concrete structures : prevention, evaluation, inspection, repair and prediction*, National Research Council Canada, NRCC-46624, Canada, **2004**.

[Darwin02] **Darwin A. B., Scantlebury J. D.**, *Retarding of corrosion processes on reinforcement bar in concrete with an FBE coating*, cement and concrete composites, 24, 73 - 78, U.K., **2002**.

[DeCesare03] **De Cesare G.**, *Extraction de paramètre météorologique de la base de donnée de l'institut suisse de météorologique ISM*, EPFL - LCH, 5 p., Lausanne, Suisse, octobre, **2003**.

[Delagrave96] **Delagrave A., Marchand J., Samson E.**, *Prediction of diffusion coefficients in cement-based materials on the basis of migration experiments*, Cement and Concrete Research, 26, 1831-1842, **1996**.

[Denarie88] **Denarié E.**, *Chronique des matériaux de construction*, Chantier, partie 1, vol.19, partie 2, vol19, pp 149-151, Lausanne, Suisse, **1988**.

[Denarie03] **Denarié E., Conciatori D., Brühwiler E.**, *Effect of Microclimate on Chloride Penetration into Reinforced Concrete*, Sixth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Thessaloniki, Greece, **2003**.

[Denarie04] **Denarié E., Brühwiler E., Maître M., Conciatori D., Wälchli T.**, *Application de la mesure de perméabilité à l'air selon Torrent pour le contrôle de la qualité du béton d'enrobage, in situ*, rapport interne provisoire, 52 p., Lausanne, Suisse, avril, **2004**.

[Denarie05] **Denarié E., Maître M., Conciatori D., Brühwiler E.**, *Air permeability measurements for the assessment of the in situ permeability of cover concrete*, International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Cape Town, South Africa, November, **2005**.

[Delmi04] **Denisov I.**, *Etude de l'hydratation et du couplage carbonatation-échanges hydriques dans les mortiers et bétons*, Université de la Rochelle - UFR Sciences, Rochelle, France, décembre, **2004**.

[Dhir93] **Dhir R. K., Byars E. A.**, *PFA Concrete : Chloride diffusion rates*, Magazine of Concrete Research, 45, 1-9, **1993**.

[DiMaio04] **Di Maio A. A., Lima L. J., Traversa L. P.**, *Chloride profiles and diffusion coefficients in structures located in marine environments*, Structural Concrete, Vol. 5, n°1, 1-4, Argentine, March, **2004**.

[Diamond86] **Diamond S.**, , Cement and Concrete Aggregates 8, 97, **1986**.

[Drochytka01] **Drochytka R., Petranek V.**, *Atmospheric concrete deterioration*, FIB, Proceedings of the first fib Congress, pp 189 - 198, Brno, Czech Republic, **2001**.

[DuPont04] **Du Pont D. P.**, *Zemdrain*, Suisse, **2004**.

[Dumont97] **Dumont A.-G., Simond E.**, *Installation de salage automatique et additif anticorrosif*, EPFL - DGC - LAVOC, 55, Lausanne, Suisse, 31.01, **1997**.

[Dumont05] **Dumont A.-G., Baumann D.**, *Critères d'opportunité et de choix des installations automatiques de déverglçage*, Office fédéral des routes, 1101, 82 p., Lausanne, Suisse, Février, **2005**.

[Duracrete99] **Duracrete**, *Models for Environmental Actions on Concrete Structures*, The European Union - Brite EuRam III, 273 p., Gouda, Netherlands, March, **1999**.

[Durrer04] **Durrer**, *Entreprise Durrer Systems, fabrication du produit d'imprégnation hydrophobe Nanofluide 5©, procédé de fabrication utilisant la nanotechnologie*, <http://www.durrer-systems.com>, **2005**.

[Dysli91] **Dysli M.**, *LE GEL et son action sur les sols et fondations*, Presse Polytechnique et Universitaires Romandes, Complément au traité de Génie Civil, 250, Lausanne, Suisse, **1991**.

[Elroy98] **McElroy A. D., Cooper G., Gall J. A.**, *Produits de déverglçage chlorure de magnésium et chlorure de calcium. Etude de la capacité de pénétration dans la glace et du volume de glace fondue*, Xème Congrès International de la Viabilité hivernale de l'AIPCR, Volume 2, pp 537 - 548, Kansas, Etats-Unis, mars, **1998**.

[Elsener95] **Elsener B., Zimmermann L., Flückiger D., Bürchler D., Böhni H.**, *Chloride penetration - non destructive determination of the free chloride content in mortar and concrete*, Chloride penetration into concrete, Rilem proceedings, 17-26, St-Rémy-les-Chevreuse, France, **1995**.

[Elsener96] **Elsener B., Flückiger D., Wojtas H., Böhni H.**, *Methoden zur Erfassung des Korrosion von Stahl in Beton*, Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Strassenbau, 521, 135 p., 1996.

[Emonet04] discussion avec M. **Patrick Emonet**, voyer de la route cantonale du Grand-Saint-Bernard.

[Enright98] **Enright M. P., Frangopol D. M.**, *Probabilistic analysis of resistance degradation or reinforced concrete bridge beams under corrosion*, Elsevier applied science publishers, 12 p., **1998**.

[Enright00] **Enright M. P., Frangopol D. M.**, *Survey and evaluation of damaged concrete bridges*, Journal of Bridge Engineering, pp 31 - 38, February, **2000**.

[Estes03] **Estes A. C., Frangopol D. M.**, *Updating Bridge Reliability Based on Bridge Management Systems Visual Inspection Results*, Journal of Bridge Engineering, ASCE, pp 374 - 382, **2003**.

[Femasse04] Logiciel de simulation du comportement des éléments de structure en béton en fonction du temps (chaleur d'hydratation, transport thermique et hydrique) nommé **MLS - Heat**, Culemborg, the Netherlands, 2004.

[Feld97] **Feld J., Carper K. L.**, *Construction failure*, A Wiley-Interscience Publication - John Wiley & Sons, inc., Second edition, 512 p., **1997**.

[FHA97] **Federal Highway Administration**, *The Status of the Nation's Highway Bridges : Highway Bridge Replacement and Rehabilitation Program and National Bridge Inventory*, Thirteenth Report to the United States Congress, Washington D. C., May, **1997**.

[Flueckiger93] **Flückiger D., Elsener B., Studer W., Böhni H.**, *Schutz von Beton durch Beschichtungen*, Ingénieurs et architectes suisses, Nr. 22, pp 375 - 382, 27 mai, **1993**.

[Flueckiger93a] **Flückiger D.**, *Perkolationsbetrachtungen zum Feuchtigkeitstransport in porösen Körpern*, Rapport de thèse ETHZ, Nr. 10223, 278 pages, **1993**.

[Flueckiger94] **Flückiger D., Elsener B., Böhni H.**, *Schutz von Beton durch Beschichtungen : Auswirkungen auf den Feuchtigkeits- und Chloridtransport, Protection du béton armé par des couches de protection : l'influence sur le transport d'humidité et des ions de chlorure*, Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Strassenbau, 511, 62 p., 1994.

[Flueckiger96] **Flückiger D., Elsener B., Böhni H.**, *Chloride im Beton: Transport und Erfassung, Chlorures dans le béton: transport et détermination*, Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Strassenbau, 520, 132 p., 1996.

[François99] **François R., Arliguie G.**, *Effect of microcracking and cracing on the development of corrosion in reinforced concrete members*, Magazine of Concrete Research, 51, 143-150, Etats-Unis, avril, **1999**.

[Frey01] **Frey F., Jirousek J.**, *Analyse des structures et milieux continus: Méthode des éléments finis (TGC volume 6)*, ISBN: 2-88074-463-6, **2001**.

[Frick93] **Frick U.**, *bauteilung der Diffusion im Grundwasser von krisallingesteinen*, Multicriteria analysis, Nagra interne Bericht, 5-20, **1993**.

[Frigione83] **Frigione G.**, *Gypsum in Cement*, Advances in Cement Technology, S.N. Gosh, ed., Pergamon Press, New York, Etats-Unis, **1983**.

[Gambera05] discussion avec M. **Gambera**, service des Routes Nationales du canton de Fribourg.

[Gehlen99] **Gehlen C., Schiessl P.**, *Probability-based durability design for the Western Scheldt Tunnel*, Journal of the fib, Structural Concrete, P1, Number 2, pp 1 - 7, Aachen, Germany, June, **1999**.

[Gerard00] **Gérard B., Marchand J.**, *Influence of cracking on the diffusion properties of cement-based materials. Part 1 : Influence of continuous cracks on the steady-state regime*, cement and concrete research, 30, 37 - 43, U.S.A., September, **2000**.

[Glass97] **Glass G.K., Buenfeld N. R.**, *The presentation of the chloride threshold level for corrosion of steel in concrete*, Corrosion science, 39, 1001 - 1003, U.K., October, **1997**.

[Glass98] **Glass G.K., Stevenson G. M., Buenfeld N. R.**, *Chloride-binding isotherms rfrom the diffusion cell test*, Cement and Concrete Research, Elsevier Science Ltd., 28 N0. 7, 939-945, London, Angleterre, **1998**.

[Glass00] **Glass G.K., Reddy B., Buenfeld N. R.**, *The participation of bound chloride in passive film breakdown on steel in concrete*, Pergamon, corrosion science, 42, 9, London, Angleterre, mars, **2000**.

[Goni90] **Goni S., Andrade C.**, Cement and Concrete Research, 20, 525, **1990**.

[Gowripalan00] **Gowripalan N., Sirivivatnonon V., Lim C. C.**, *Chloride diffusivity of cobcrete cracked in flexure*, cement and concrete research, 30, 725 - 730, U.S.A., january, **2000**.

[Gruber88] **Gruber C.**, *Mécanique générale*, Presse Polytechnique et Universitaires Romandes, 620 p., Lausanne, Suisse, **1988**.

[Habel04] **Habel K.**, *Structural Behaviour of Elements Combining Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concretes (UHPFRC) and Concrete*, EPFL, Swiss Federal Institute of Technology, Doctoral Thesis, No. 3036, 196 p., Lausanne, Switzerland, **2004**.

[Halamickova95] **Halamickova P., Detwiler R. J.**, *Waterpermeability and chlorid'ion diffusion in Portland cement mortars : Relationship to sand content and critical pore diameter*, Cement and Concrete Research, 25, 790-802, **1995**.

[Haldi98] **Haldi P.-A., Vulliet L.**, *Fiabilité et sécurité des systèmes civils*, PPUR, 265, Lausanne, Switzerland, 03, **1998**.

[Hamfler88] **Hamfler H.**, *Berechnung von Temperatur-, Feuchte- und Versichungsfeldern in erhärtenden Betonbauteilen nach des Methode der finiten Elemente*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 395, 159 p., Berlin, Allemagne, **1988**.

[Hammerschlag05] **Hammerschlag Jean-Gabriel**, communication téléphonique, juin 2005.

[Hanke98] **Hanke H.**, *Nouvelles expériences avec l'emploi des abrasifs en Allemagne*, Xème Congrès International de la Viabilité hivernale de l'AIPCR, Volume 2, pp 487 - 492, Wiesbaden, Allemagne, **1998**.

[Hansen86] **Hansen T. C.**, *Physical structure of hardened cement paste. A classical approach*, Materials and Structures, Vol. 19, No. 114, pp 423-436, France, **1986**.

[Hansen97] **Hansen E.J., Saouma V. E.**, *Numerical simulation of reinforced concrete deterioration, part I and II*, ACI Materials Journal, 22 + 21 p, Colorado, Etats-Unis, juillet, **1997**.

[Hansen99] **Hansen E. J., Saouma V. E.**, *Numerical Simulation of Reinforced Concrete Deterioration - Part I : Chloride Diffusion*, ACI Materials Journal, Title no 96-M22, pp 173 - 180, Etats-Unis, March - April, **1999**.

[Hansson90] **Hansson M. , Sorensen B.**, *Corrosion Rates of Steel in Concrete*, eds. N. S. Berke, V. Chaker and D. Whiting, p.3, ASTM STP 1065, **1990**.

[Hartl84] **Hartl G.**, *Korrosionsschutz der Bewehrung bei Tausalzwirkung*, Cement and Concrete Research, 29, N° 1, pp 16 - 22, **1984**.

[Hartl88] **Hartl G.**, *Korrosionsschutz der Bewehrung, insbesondere bei Chlorideinwirkung*, Instandsetzung und Erhaltung von Bauten aus Beton und Stahlbeton : Internationale Fachtagung Innsbruck, Institut für Baustofflehre und Materialprüfung der Universität Innsbruck, pp 49 - 60, Januar 15 - 16, **1988**.

[Hausmann67] **hausmann D. A.**, ., *Materials protection*, 6 (11), 19, **1967**.

[Hazrati98] **Hazrati K.**, *Etude des mécanismes de transport de l'eau par absorption capillaire dans les matériaux cimentaires usuels et de haute performance*, Université LAVAL, 205, Québec, Canada, Juin, **1998**.

[Hearn05] **Hearn N., Hooton R. D., Nokken M. R.**, *Pore Structure, Permeability, and Penetration Resistance Characteristic of Concrete*, livre en préparation (reçu lors d'une visite), pp 361 - 386, **2005**.

[Helland04] **Helland S.**, *Proposal for chapter 1,2 and Annex A for a fib Model Code for Service Life Design (SLD) based on the text of chapter 1 and 2 of prEN 1992-1 version July 2002 and EN 1990:2002*, Normalisation (projet), fib, Oslo, Norway, March, **2004**.

[Henriksen93] **Henriksen C. F., Stoltzner E.**, *Chloride corrosion in danish Bridge column*, Concrete International, 15, N° 8, pp 55 - 60, **1993**.

[Hertig99] **Hertig J.-A.**, *Etudes d'impact sur l'environnement*, Presse Polytechnique et Universitaires Romandes, Traité du Génie Civil, 23, 453 p., Lausanne, Suisse, **1999**.

[Hill02] **Hill J. H., Petrucci R. H., Dion M., Lamoureux M.**, *Chimie générale*, Pearson Education, 921 p., **2002**.

[Hobbs99] **Hobbs D. W.**, *The final 15 Seconds*, <https://perth.uwlax.edu/globalengineer/draft/Problem%20bridges/index.problems.html>.

[Holt] **Holt N.**, *Aggregate influence on chlorid'ion diffusion into concrete*, cement and concrete research, U.K., august, **1999**.

[Hong99] **Hong K., Hooton R. D.**, *Effect of cyclic exposure on penetration of concrete cover*, Cement and Concrete Research, 29, pp 1379 - 1386, Toronto, Canada, March, **1999**.

[Hong00] **Hong K., Hooton R. D.**, *Effects of fresh water exposure on chloride contaminated concrete*, cement and concrete research, 30, 1199 - 1207, U.K., June, **2000**.

[Hope87] **Hope B. B., Ip A. K. C.**, *Chloride corrosion threshold in concrete*, ACI Materials Journal, 306-314, Etats-Unis, **1987**.

[Hornain95] **Hornain H., Marchand J., Duhot V., Moranville-Regourd M.**, *Diffusion of chlorid'ions in limestone filler blended cement pastes and mortars*, Cement and Concrete Research, 25, 1667-1678, **1995**.

[Hossain03a] **Hossain K. M. A.**, *Effect of Volcanic Pumice on the Corrosion Resistance and Chloride Diffusivity of Blended Cement Mortars*, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1 N° 1, pp 54 - 62, April, **2003**.

[Houst83] **Houst Y. F., Roelfstra P. E., Wittmann F. H.**, *A model to predict service life of concrete structures*, 181-186, Lausanne, Suisse, **1983**.

[Houst92a] **Houst Y. F.**, *Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pâte de ciment durcie*, EPFL, Thèse n°1108, 228 p., Lausanne, Suisse, **1992**.

[Houst02] **Houst Y. F., Wittmann F. H.**, *Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation*, Cement and Concrete Research, 32 (2002), 1923-1930, June, **2002**.

[Hundt75] **Hundt J.**, *Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 256, 108 p., Berlin, Allemagne, **1975**.

[Hundt78] **Hundt J., Wagner A.**, *Sorptionsuntersuchungen an Zementstein, Zementmörtel und Beton*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DafStb 297, pp 27-39, Germany, **1978**.

[Hunkeler99a] **Hunkeler F., Hermann K.**, *La carbonatation du béton*, TFB Bulletin du ciment, 12, 7 p., Suisse, Décembre, **1999**.

[Hunkeler02] **Hunkeler F., Ungricht H., Merz C.**, *Vergleichende Untersuchungen zum Chlorwiderstand von Betonen*, Office fédéral des routes, 568, 177, Wildegg, Suisse, novembre, **2002**.

[Hussain95] **Hussain S. E., Rasheeduzzafar, Al-Musallam A., Al-Gahtini A. S.**, *Factors affecting threshold chloride for reinforcement corrosion in concrete*, Cement and Concrete Research, 25, 1543-1555, **1995**.

[IRC04] fiches techniques de l'institut de recherche en construction du conseil national de recherche du Canada, [http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/bsi/83-3\\_F.html](http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/bsi/83-3_F.html) par Madeleine Rousseau.

[Ishida00] **Ishida T., Maekawa K.**, *Modelling of PH profile in pore water based on mass transport and chemical equilibrium theory*, JSCE, N°648/V-47, 16 p., Tokyo, Japan, May, **2000**.

[Ishida00a] **Ishida T., Maekawa K.**, *A Computational Method for Performance Evaluation of Cementitious Materials and Structures under Various Environmental Actions*, 5 p., Tokyo, Japan, **2000**.

[Ishida02] **Ishida T.**, *An integrated computational system of mass/energy generation, transport and mechanics of materials and structures*, fib-news, 35-42, Tokyo, Japan, mars, **2002**.

[Ishida02a] **Ishida T., Soltani M., Maekawa K.**, *Theoretical aspects of influential parameters on process of concrete carbonatation*, Tokyo, Japan, **2002**.

- [Janz97] **Janz M.**, *Methods of measuring the moisture diffusivity at high moisture levels*, Thèse de doctorat, University of Lund - division of building materials, 73, Lund, Suède, **1997**.
- [Jaun03] **Jaun A.**, *Numerical Methods for partial and differential equations*, Swedish Netuniversity, 92 p., Stockholm, Sweden, **2003**.
- [Javet95] **Javet P. A., Lerch P., Plattner E.**, *Introduction à la chimie pour ingénieurs*, Presse Polytechnique et Universitaires Romandes, Deuxième édition, 453 p., Lausanne, Suisse, **1995**.
- [Johannesson98] **Johannesson B.**, *Modelling of transport processes involved in service life prediction of concrete*, Report TVBM - 3083, Licentiate Thesis, Lund, **1998**.
- [Jones93] **Jones M. R., McCarthy M. J., Dhir R. K.**, *Chloride resistance concrete*, Concrete 2000, Editors: Dhir R. K. and Jones M. R., E&FN Spon, pp 1429 - 1444, London, **1993**.
- [Jones94] **Jones M. R., Dhir R. K., Gill J. P.**, *Concrete surface treatment : effect of exposure temperature on chloride diffusion resistance*, cement and concrete research, V. 25 N° 1, 197 - 208 , U.K., april, **1994**.
- [Juergen93] **Jürgen-Henning K., Solacolu C.**, *Verbesserung der Betonrandzone*, Beton, 5, pp 222 - 225, **1993**.
- [Justnes96] **Justnes H.**, *A review of chloride binding in cementitious systems*, cement and concrete, Trondheim, Norway, **1996**.
- [Kamp] **Kamp C. L., Roelfstra P. E., Wittmann F. H.**, *Aspects of Moisture flow in Hardened Cement Paste and Concrete*, pp 329 - 338, Lausanne, Suisse.
- [Kassir01] **Kassir M. K., Ghosn M.**, *Chloride-induced corrosion of reinforced concrete bridge decks*, cement and concrete research, 32, 139 - 143, New York, U.S.A., July, **2001**.
- [Kaufmann99] **Kaufmann J.**, *Experimental Identification of Damage Mechanisms in Cementitious Porous Materials on Phase Transition of Pore Solution under Frost De icing Salt Attack*, EPFL, 2037, 177 p., Lausanne, Suisse, **1999**.
- [Kavcic02] **Kavcic F., Poljansek K.**, *RC constructions in marine environments*, Thomas Telford Publications, Concrete for extreme conditions, proceedings of the international conference held at the university of Dundee, pp 246 - 254, Scotland, England, September, **2002**.
- [Kinloch87] **Kinloch A. J.**, *Adhesion and Adhesives : science and technology*, Chapman and Hall, London, Angleterre, **1987**.
- [Kirkpatrick02a] **Kirkpatrick T. J., Weyers R. E., Anderson-Cook C. M., Sprinkel M. M.**, *Probabilistic model for the chloride-induced corrosion service life of bridge decks*, cement and concrete research, 1 - 18, Blacksburg, U.S.A., june, **2002**.
- [Kirkpatrick02] **Kirkpatrick T. J., Weyers R. E., Sprinkel M. M., Anderson-Cook C. M.**, *Impact of specification changes on chloride-induced corrosion service life of bridge decks*, Cement and Concrete Research, Pergamon, 32, 1189-1197, Blacksburg, U.S.A., **2002**.
- [Kong02] **Kong J. S., Ababneh A. N., Frangopol D. M., Xi Y.**, *Reliability analysis of chloride penetration in saturated concrete*, Probabilistic Engineering Mechanics, 17, pp 305 - 315, **2002**.
- [Kong05] **Kong J. S., Frangopol D. M.**, *Sensitivity analysis in reliability-based lifetime performance prediction using simulation*, Journal of Materials in civil engineering, pp 296 - 306, may / June, **2005**.
- [Konin98] **Konin A., François R., Arliguie G.**, *Penetration of chlorides in relation to the microcracking state into reinforced ordinary and high strength concrete*, McGraw-Hill - London, 31, 310-316, Toulouse, France, juin, **1998**.
- [Kraker82] **Kraker A., Tichler J. W., Vrouwenvelder A. C. W. M.**, *Safety, reliability and service life of structures*, Heron, 27, n°1, **1982**.
- [Kreijger84] **Kreijger P. C.**, *The skin of concrete composition and properties*, Matériaux et constructions, 17 n°100, pp 275 - 283, **1984**.

[Kropp95] **Kropp J., Hubert K., Hilsdorf H., Grube H., Andrade C., Nilsson L.-O.**, *Transport mechanisms and definitions*, Rilem Report 12, Edited by J. Kropp and H. K. Hilsdorf, 321 p., **1995**.

[Kuenzel95] **Künzel H. M.**, *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components*, IRM Verlag, 102 p., Stuttgart, Allemagne, **1995**.

[Laferriere05] **Laferrière F.**, *Surveillance des ouvrages de génie civil par capteurs à fibres optiques : capteurs d'ions chlore*, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Thèse n° (en cours), 159 p., Lausanne, Suisse, **2005**.

[Lambert91] **Lambert P., Page C. L., Vassie P. R. W.**, *Investigation of reinforcement corrosion. Electrochemical monitoring of steel in chloride contaminated concrete*, Matériaux et constructions (RILEM) 24, N° 143, pp 351 - 358, **1991**.

[Larrard99] **Larrard F., Sedran T., Kaplan D.**, *Rhéologie des bétons fluides*, Monographie d'études et de recherches 1996-1997, Réseau des LPC, **1999**.

[Lattion01] discussion téléphonique avec M. **Hervé Lattion** du service des routes du canton du Valais, septembre 2001.

[Laurinavicius98] **Laurinavicius A., Cygas D.**, *Problèmes d'entretien en hiver de la voirie urbaine en Lituanie*, Xème Congrès International de la Viabilité Hivernale de l'AIPCR, Volume 3, pp 689 - 700, Vilnius, Lituanie, mars, **1998**.

[Lay03] **Lay S.**, *Service life design of reinforced concrete structures exposed to de-icing salts - A case study*, The third International IABMAS Workshop on Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems, 107 - 116, Lausanne, Suisse, mars, **2003**.

[Léon-Michaud05] trois sites web : <http://www.romandie.com/ats/newsATS/display2.asp?page=20050603164257630172019048030.xml>;  
<http://www.mpsr.ch/modules.php?name=News&file=print&sid=1018>;  
<http://www.neuch.ch/ats.php?class=ats2&full=true&id=14931>.

[Li02] **Li Y., Vrouwenvelder T.**, *Deterioration prediction based on spatial fluctuation of structural properties*, 8 p., Delft, Netherlands.

[Lindgard03] **Lindgard J., Skjolsvold O., Kjellsen K. O.**, *Norwegian Experience in the Use of Puzzolan to Reduce Chloride-Ion Intrusion*, Sixth Canmet/ACI international conference, 1, 721 - 736, Thessaloniki, Greece, **2003**.

[Lindvall00] **Lindvall A.**, *Probabilistic, performance based service life design of concrete structures - environmental actions and response*, RILEM, proceeding PRO 19, edited by C. Andrade and J. Kropp, Pro19, 14, Göteborg, Sweden, septembre, **2000**.

[Lindvall00a] **Lindvall A., Andersen A., Nilsson L.-O.**, *Chloride ingress data from Danish and Swedish road bridges exposed to splash from de-icing salt*, Dept. of building materials, Chalmers University of Technology, 19, Göteborg, Suède, **2000**.

[Lindvall01] **Lindvall A.**, *Environmental actions and response, reinforced concrete structures exposed in road and marine environments*, Chalmers University of technology, P-01:3, 320 p., Göteborg, Suède, **2001**.

[Litvan83] **Litvan G. G.**, *Détérioration des garages de stationnement*, IRC - Canadian Building Digest, CBD-224-F, **1983**.

[Locke80] **Locke C. E., Siman A.**, *Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete* (eds. D. E. Tonini and J. M. Gaidis), ASTM STP 713, p. 3, **1980**.

[Lounis03] **Lounis Z.**, *Probabilistic modelling of chloride contamination and corrosion of concrete bridge structures*, National Research Council Canada, NRCC-46426, Canada, **2003**.

[Lukas85] **Lucas W.**, *Zur Frage der Chloridbindung und -korrosion von Stahl bei nachträglicher Einwirkung von Chlorid*, Filderstadt : edition Lack und Chemie., Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Berichtsband des internationalen Kolloquiums, pp 171 - 173, **1985**.



[Lunk98] **Lunk P., Mayer G., Wittmann F. H.**, *Einfluss des Eindringens von Chloriden auf die wartungsfreie Nutzungsdauer von Stahlbetontragwerken*, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS), Bericht n° 536, Zürich, Suisse, **1998**.

[Lunk98a] **Lunk P.**, *Penetration of water and salt solutions into concrete by capillary suction*, Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 4, 399-422, Zürich, Suisse, **1998**.

[Maage94] **Maage M., Helland S., Carlsen J. E.**, *Chloride penetration in high performance concrete exposed to marine environment*, Proceedings of the Rilem Int. Workshop, Durability of High performance Concrete, RILEM 3C Coord. Committee for concrete technology, editor: H. Sommer, pp 194 - 207, **1994**.

[MacBean87] **MacBean E., Al-Nassri S.**, *De icing salts on roads*, University of Waterloo, 231 - 238, Ontario, Canada, April, **1987**.

[MacDonald95] **MacDonald K. A., Northwood D. O.**, *Experimental measurements of chlorid'ion diffusion rates using a two-compartment diffusion cell : effect of material and test variables*, Cement and Concrete Research, 25, 1407-1416, **1995**.

[Maekawa00] **Maekawa K., Ishida T.**, *Service-life evaluation of reinforced concrete under coupled forces and environmental actions*, University of Tokyo, 20 p., Tokyo, Japan, **2000**.

[Maekawa02] **Maekawa K., Ishida T.**, *Modelling of structural performances under coupled environmental and weather actions*, Materials and Structures, 35, pp 591 - 692, Tokyo, Japan, décembre, **2002**.

[Maltais03] **Maltais Y., Ouellet E., Marchand J., Samson E., Burke D.**, *Prediction of the long-term durability of lightweight aggregate concrete mixtures under severe marine environment*, Advances in Cement and Concrete, Proceedings of the ECI conference, Copper Mountain, 329-338, Colorado, USA, **2003**.

[Mancio04] **Mancio M., Zhang J., Monteiro P. J. M.**, *Non-destructive surface measurement of corrosion of reinforcing steel in concrete*, National Research Council Canada, NRCC-47296, Canada, **2004**.

[Mangat88] **Mangat P. S., Gurusamy K.**, *Corrosion resistance of steel fibres in concrete under marine exposure*, Cement and Concrete Research, 18, N°1, pp 44 - 54, **1988**.

[Mangat91] **Mangat P. S., Molloy B. T.**, *Influence of pfa and microsilica on chloride induced corrosion of reinforcement*, Cement and Concrete Research, 21, N° 5, pp 819 - 834, **1991**.

[Mangat94] **Mangat P. S., Molloy B. T.**, *Prediction of free chloride concentration in concrete using routine inspection data*, Magazine of Concrete Research, 46, 279-287, **1994**.

[Mangat95] **Mangat P. S., Molloy B. T.**, *Chloride binding in concrete containing PFA, gbs or silica fume under sea water exposure*, Magazine of Concrete Research, 47, 129-141, **1995**.

[Marchand98] **Marchand J., Samson E., Maltais Y.**, *Modelling microstructural alterations of concrete subjected to external sulfate attack*, Materials Science of Concrete, 211-257, Laval, Canada, **1998**.

[Marchand00] **Marchand J., Bentz D. P., Samson E., Maltais Y.**, *Influence of calcium hydroxide dissolution on the transport properties of hydrated cement systems*, Materials Science of Concrete, Université de Laval, 113-129, Laval, Canada, **2000**.

[Marchand01a] **Marchand J.**, *Modelling the behaviour of unsaturated cement systems exposed to aggressive chemical environments*, materials and structures, 34, Québec, Canada, **2001**.

[Marchand02] **Marchand J., Samson E., Maltais Y., Lee R.J., Sahu S.**, *Predicting the performance of concrete structures exposed to chemically aggressive environment-field validation*, Materials and Structures, 35, pp 623 - 631, Québec, Canada, décembre, **2002**.

[Marchand02a] **Marchand J., Samson E., Beaudoin J. J.**, *Modelling ion transport mechanism in unsaturated porous media*, Encyclopedia of surface and colloid science, Canada, **2002**.

[Marchand02b] **Marchand J., Samson E., Maltais Y., Beaudoin J. J.**, *Theoretical analysis of the effect of weak sodium sulfate solutions on the durability of concrete*, Canada, **2002**.

[Marchand02c] **Marchand J., Samson E., Maltais Y., Lee R.J.**, *Predicting the performance of concrete structures exposed to chemically aggressive environments-fields validation*, 2nd material specialty conference of the Canadian society for civil engineering, 1-13, Québec, Canada, **2002**.

[Marchand03] **Marchand J., Samson E., Burke D., Tourney P., Thaulow N., Sahu S.**, *Predicting the Microstructural Degradation of Concrete in Marine Environment*, Sixth Canmet/ACI international conference, 1, 1127 - 1145, Thessaloniki, Greece, **2003**.

[Marchand04] **Marchand J.**, rapport interne remis lors d'un séjour au Québec, Canada, **2004**.

[Marosszeky93] **Marosszeky M.**, *Textile From Method to Improve Concrete Durability*, Concrete International, 37 p., November, **1993**.

[Martinez01] **Martinez I., Andrade C.**, *Advances in the corrosion rate monitoring in real structures*, FIB, Proceedings of the 1st fib Congress, pp 223 - 232, Madrid, Espagne, **2001**.

[Martin\_Pérez00] **Martin-Pérez B., Zibara H., Hooton R. D., Thomas M. D. A.**, *A study of the effect of chloride binding on service life predictions*, cement and concrete research, 30, 1215 - 1223, Toronto, Canada, June, **2000**.

[Masi97] **Masi M., Colella D., Radaelli G., Bertolini L.**, *Simulation of chloride penetration in cement-based materials*, Cement and Concrete Research, Pergamon, Elsevier Science Ltd., 27, No. 10, 1591-1601, Milan, Italie, **1997**.

[Masuda02] **Masuda M. Y.**, *Condition survey of salt damage to reinforced concrete buildings in Japan*, Thomas Telford Publications, Concrete for extreme conditions, proceedings of the international conference held at the university of Dundee, pp 823 - 836, Scotland, England, September, **2002**.

[Matin03] **Burky P.**, *Une organisation complexe*, La Matin, article paru le 31 janvier 2003, Lausanne, Suisse, janvier, **2003**.

[McCarter95] **McCarter W. J., Emerson M., Ezirim H.**, *Properties of concrete in the cover zone : developments in monitoring techniques*, Magazine of Concrete Research, 47, 243-251, **1995**.

[McDonel96] **McDonel R.**, *Walnut Street Bridge collapse*, <https://perth.uwlab.edu/globalengineer/draft/Problem%20bridges/index.problems.html>, **1996**.

[Meijers01] **Meijers S. J. H., Bijen J. M., de Borst R., Fraaij A. L. A.**, *Computational modelling of chlorid'ion transport in reinforced concrete*, Experimental and Numerical Research for the Design and Optimization of Cement and Concrete, 46, pp 207 - 216, Delft, Suède, **2001**.

[Meijers02] **Meijers S. J. H., Bijen J. M., Borst R., Fraaij A. L. A.**, *Computational modelling of chlorid'ion transport in reinforced concrete*, Thomas Telford Publications, Concrete for extreme conditions, proceedings of the international conference held at the university of Dundee, pp 91 - 99, Scotland, England, September, **2002**.

[Meijers02b] **Meijers S. J. H., Bijen J. M., Borst R., Fraaij A. L. A.**, *Chloride Ingress Modelling: Comparison of Experimental and Numerical Data*, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, 12 p., Delft, Netherlands, avril, **2002**.

[Meijers03] **Meijers S. J. H.**, *Computational modelling of chloride Ingress in concrete*, DUP science, Delft University Press, 170, Delft, Hollande, **2003**.

[Mensi88] **Mensi R., Acker P., Attolou A.**, *Séchage du béton: analyse et modélisation*, Materials and Structures, Vol. 21, pp 3-12, France, **1988**.

[MétéoSuisse04] <http://www.meteosuisse.ch>, institut suisse de la météorologie ISM.

[Midgley84] **Midgley H. G., Illston J. M.**, *The penetration of chlorides into hardened cement pastes*, Cement and Concrete Research, 14, 4, pp 546 - 558, July, **1984**.

[Moritz98] **Moritz K.**, *Efficacité et rentabilité des installations de pulvérisation d'antigel*, Xème Congrès International de la Viabilité Hivernale de l'AIPCR, Volume 2, pp 303 - 313, Bergisch, Allemagne, mars, **1998**.

[Morris01] **Morris W., Vasquez M.**, *A migrating corrosion inhibitor evaluated in concrete containing various contents of admixed chlorides*, cement and concrete research, 32, 259 - 267, U.K., august, **2001**.

[Mukhopadhyaya02] **Mukhopadhyaya P., Kumaran K., Normandin N., Goudreau P.**, *Effect of surface temperature on water absorption coefficient of building materials*, Journal of Thermal Envelope and Building Science, NRCC-45369, v.26, no.2, pp 179 - 195, Ottawa, Canada, October, **2002**.

[Navi99] **Navi P., Pignat C.**, *Three-dimensional characterization of the pore structure of a simulated cement paste*, Cement and Concrete Research, Volume 29, Number 4, pp. 507-514, April, **1999**.

[Nendaz02] mise à disposition des plans du ponts sur la Denève par l'intermédiaire de monsieur **S. Nendaz**, du service des Routes Nationales du canton de Vaud.

[Ngala95] **Ngala V. T., Page C. L., Parrott L. J., Yu S. W.**, *Diffusion in cementitious materials : II Further investigations of chloride and oxygen diffusion in well-cured OPC and OPC/30% PFA pastes*, Cement and Concrete Research, 25, 819-826, **1995**.

[Nilsson96] **Nilsson L.-O., Poulsen E., Sandberg U., Sorensen M. G., Klinghoffer O.**, *HETEK, Chloride penetration into concrete, State-of-Art, Transport processes, corrosion initiation, test methods and prediction models*, The Road Directorate, Report n° 53, 150 p., Copenhagen, Scandinavie, **1996**.

[Nuernberger01] **Nuernberger U.**, *Corrosion induced failures of prestressed concrete structures*, FIB, Proceedings of the 1st fib Congress, pp 17 - 26, Stuttgart, Allemagne, **2001**.

[Oberbeck95] **Oberbeck N., Duddeck H., Ahrens H.**, *Stationärer Wärme-Feuchte-Schadstoff-Transport in Beton Theorie und Berechnung*, Institut für Statik des Technischen Universität Braunschweig, 95-79, 155, Braunschweig, Allemagne, **1995**.

[OFROU05] **Office Fédéral des Routes**, *Portrait de l'office fédéral des routes*, Office fédéral des routes, rapport annuel 2004, Berne, Suisse, **2005**.

[OFS05] **Schweizer M.**, *Compte routier suisse Résultats définitifs 2002*, Office fédéral de la statistique Suisse, Schweizer Martin, OFS, Section des transports, tél. 032 713 68 93 E-Mail: martin.schweizer@bfs.admin.ch Bestellnummer: 596-0200, Suisse, **2005**.

[Oh01] **Oh B., Jang B. S.**, *Chloride penetration and corrosion analysis in reinforced concrete structures*, FIB, Proceedings of the first fib Congress, pp 161 - 168, Seoul, Korea, **2001**.

[Olsen83] **Olsen M. P. J.**, *Mathematical modelling of the freezing process of concrete and aggregates*, Cement and Concrete Research, 14, 113 - 122, Texas, Etats-Unis, **1983**.

[Page85] **Page C. L., Havdahl J.**, *Electrochemical monitoring of corrosion of steel in microsilica cement pastes*, Matériaux et Constructions 18, N° 103, pp 41 - 47, **1985**.

[Page91] **Page C. L., Lambert P., Vassie P. R. W.**, *Investigations of reinforcement corrosion. The pore electrolyte phase in chloride-contaminated concrete*, Matériaux et Constructions (RILEM) 24, N° 142, pp 243 - 252, **1991**.

[Papadakis89] **Papadakis V. G., Vayenas C. G., Fardis M. N.**, *A reaction Engineering approach to the problem of concrete carbonation*, AIChE Journal, Vol. 35, No. 10, pp 1639 - 1650, Copenhagen, Danemark, October, **1989**.

[Papadakis90] **Papadakis V. G., Fardis M. N., Vayenas C. G.**, *Fundamental concrete carbonation model and application to durability of reinforced concrete*, Fifth International Conference Durability of Building Materials and Components, Proceedings, pp 27 - 38, Brighton, Angleterre, **1990**.

[Papadakis91] **Papadakis V. G., Vayenas C. G., Fardis M. N.**, *Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete*, ACI Materials Journal, V. 8, No 2, pp 186 - 196, Copenhagen, Danemark, March - April, **1991**.

[Papadakis91a] **Papadakis V. G., Vayenas C. G., Fardis M. N.**, *Fundamental Modelling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation*, ACI Materials Journal, Title no 88-M43, V. 88, No. 4, pp 363 - 373, August, **1991**.

[Papadakis92] **Papadakis V. G., Fardis M. N., Vayenas C. G.**, *Hydration and Carbonation of Pozzolan Cements*, ACI Materials Journal, V.89 No. 2, pp 119 - 130, Copenhagen, Denmark, **1992**.

[Papadakis92a] **Papadakis V. G., Fardis M. N., Vayenas C. G.**, *Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation*, Materials and Structures, 25, pp 293 - 304, **1992**.

[Papadakis00] **Papadakis V. G.**, *Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress*, Cement and Concrete Research, Volume 30, Issue 2, pp 291 - 299, Taastrup, Denmark, February, **2000**.

[Paramasivam02] **Paramasivam P., Lim C. T. E., Ong K. C. G.**, *Performance of reinforced concrete piles exposed to marine environment*, Thomas Telford Publications, Concrete for extreme conditions, proceedings of the international conference held at the University of Dundee, pp 525 - 536, Scotland, England, September, **2002**.

[Parrott94a] **Parrott L. J.**, *Design for avoiding damage due to carbonation-induced corrosion*, 3rd CANMET/ACI Conference on durability of concrete, Nice, May, **1994**.

[Paulsson02] **Paulsson -Tralla J., Silfwerbrand J.**, *Estimation of chloride ingress in uncracked and cracked concrete using surface measured concentrations*, ACI Materials Journal, V.99, N°1, pp 27-36, January - February, **2002**.

[Pearson79] **Pearson E.S., Johnson N.L., Burr I.W.**, *Comparisons of the percentage points of distributions with the same first four moments, chosen from eight different systems of frequency curves*, Communication in statistics; simulation and computation, B8, n°3, pp 191-229, Purdue, **1979**.

[PechCanul02] **Pech-Canul M. A., Castro P.**, *Corrosion measurements of steel reinforcement in concrete exposed to a tropical marine atmosphere*, cement and concrete research, 32, 491 - 498, U.K., October, **2002**.

[Pel00] **Pel L., Kopinga K., Kaasschieter E. F.**, *Saline absorption in calcium-silicate brick observed by NMR scanning*, 33, 1380 - 1385, Eindhoven, Netherlands, **2000**.

[Perriman02] **Perriman W. S.**, *Probabilistic characterisations of durability of reinforced concrete*, 5th International Conference on Mathematical Modelling and Computing in Biology and Medicine, pp 425 -429, University of Milan, July, **2002**.

[Persson04] **Persson B.**, *chloride migration coefficient of self-compacting concrete*, Materials and Structures RILEM publications, vol. 37, 82-91, Lund, Sweden, march, **2004**.

[Petre00] **Petre-Lazar I.**, *L'évaluation du comportement en service des ouvrages en béton armé soumis à la corrosion des aciers - Outil d'aide à la décision*, Université LAVAL, 263 p., Québec, Canada, Septembre, **2000**.

[Pettersson90] **Pettersson K. H.**, *Corrosion threshold value and corrosion rate in reinforced concrete*, CBI Report 2:92, Swedish cement and concrete research institute, Stockholm, **1990**.

[Pettersson93] **Pettersson K. H.**, *The chloride threshold value and the corrosion rate in reinforced mortar specimens*, Chloride Penetration into Concrete Structures : Nordic Miniseminar, N° P-93:1, Vol 1, p. 461, London, January, **1993**.

[Pettersson95] **Pettersson K. H.**, *Chloride threshold value and the corrosion rate in reinforced concrete*, Corrosion of Reinforcement : Field and Laboratory Studies for Modelling and Service Life (Ed. K. Tuutti), Lund institute of technology, division of building materials, pp 257 - 266, February 1 - 2, **1995**.

[Pettersson96] **Pettersson K. H.**, *Factors influencing chloride-induced corrosion of reinforcement in concrete*, 7, 334 - 341, Gälve, Suède, May, **1996**.

- [Peyer87] **Peyer B.**, *Untersuchungsergebnisse zum Unglück im Hallenbad Uster*, Schweizer Ingenieur und Architekten, n° 87, pp 184 - 185, **1987**.
- [Pfeifer86] **Pfeifer D. W., Landgren J. R., Perenchio W. F.**, *Concrete, chlorides, cover and corrosion*, Journal of the Prestressed Concrete Institution 31, N° 4, pp 42 - 53, **1986**.
- [Pfeifer86a] **Pfeifer D. W., Landgren J. R., Zoob A.**, *Protective systems for new prestressed and substructure concrete*, Journal of the Prestressed Concrete institution 31, Final report N° FHWA-RD-86-193, N° 4, pp 42 - 54, **1986**.
- [Pignat03] **Pignat C.**, *Simulation numérique de l'hydratation du silicate tricalcique : caractérisation de la structure poreuse et de la perméabilité*, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2763, Lausanne, Suisse, **2003**.
- [Prader85] **Prader D.**, *Le facteur de sécurité*, Editorial : Droit de la construction, pp 42 - 43, **1985**.
- [Prezzi96] **Prezzi M., Geykens Ph., Monteiro P. J. M.**, *Reliability approach to service life prediction of concrete exposed to marine environments*, ACI Materials Journal, 93, 544-552, **1995**.
- [PROCEQ97] **Proceq**, *TORRENT Permeability Tester - Mode d'emploi*, Proceq SA, Zürich.
- [Puatatsananon02] **Puatatsananon W.**, *Deterioration of Reinforced and Massive Concrete; a Multi-Physics Approach*, PhD thesis, University of Colorado, 182 p., Boulder, USA, **2002**.
- [Rappaz98] **Rappaz J., Picasso M.**, *Introduction à l'analyse numérique*, Presse Polytechnique et Universitaires Romandes, 256 p., Lausanne, Suisse, **1998**.
- [Rasheeduzzafar91] **Rasheeduzzafar, Hussain S. E., Al-Saadoun S. S.**, *Effect of cement composition on chloride binding and corrosion reinforcing steel in concrete*, Cement and Concrete Research, 21, N° 5, pp 777 - 794, **1991**.
- [Rasheeduzzafar92] **Rasheeduzzafar, Hussain S. E., Al-Saadoun S. S.**, *Effect of tricalcium aluminate content of cement on chloride binding and corrosion of reinforcing steel in concrete*, ACI Materials Journal, 89, N° 1, pp 3 - 12, **1992**.
- [Raupach93] **Raupach M.**, *Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Instandsetzungen bei Betonen mit hohem Chloridgehalt*, Forschungsbericht Nr. F 261, Institute für Bauforschung, Aachen, **1993**.
- [Reddy02] **Reddy B., Glass G.K., Lim P. J., Buenfeld N. R.**, *On the corrosion risk presented by chloride bound in concrete*, cement and concrete composites, 24, 1 - 5, U.K., **2002**.
- [Richardson02] **Richardson M.**, *Fundamentals of durable reinforced concrete*, Modern concrete technology, 11, 259 p., New York, United States of America, **2002**.
- [Richartz69] **Richartz W.**, *Die Bindung von Chlorid bei der Zementhärtung*, Zement-Karl-Gips 58, N° 10, pp 447 - 456, **1969**.
- [Ritthichauy01] **Ritthichauy W., Sugiyama T., Tsuji Y., Suda T.**, *Thermodynamic Law applied for the diffusion of chlorid'ions ion concrete*, FIB, Proceedings of the 1st fib Congress, pp 115 - 120, Gunma, Japan, **2001**.
- [Rodriguez96] **Rodriguez J.**, *Service life of concrete structures*, Durability of building materials and components, 7, Stockholm, Suède, May, **1996**.
- [Rodriguez05] discussion avec M. **Robert Rodriguez**, service des Routes Nationales du canton de Genève.
- [Roelfstra89] **Roelfstra P. E.**, *A numerical approach to investigate the properties of concrete - numerical concrete*, EPFL, Swiss Federal Institute of Technology, Doctoral Thesis, N° 788, Lausanne, Switzerland, **1989**.
- [Roelfstra00] **Roelfstra G.**, *Modèle d'évolution de l'état des ponts-routes en béton*, Thèse de doctorat, Thèse N° 2310, 153, Lausanne, Suisse, **2000**.
- [Roelfstra01] **Roelfstra G., Hajdin R., Brühwiler E.**, *Modèle d'évolution de l'état des ponts-routes en béton armé*, Office fédéral des routes, 560, 160, Lausanne, Suisse, janvier, **2001**.

- [Roesli83] **Rösli A.**, *Frost- und Tausalzbeständigkeit von Beton*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Forschungsprojekt 9/78, 154 p., Zürich, Schweiz, März, **1983**.
- [Rosenblueth81] **Rosenblueth E.**, *Two-point estimates in probabilities*, Applied Mathematical Modelling, vol 5, pp 329-335, Mexique, Mexique, **1981**.
- [Ross96] **Ross S. M.**, *Initiation aux probabilités*, Presse Polytechnique et Universitaires Romandes, 4e édition, 445 p., Lausanne, Suisse, **1996**.
- [Sadouki87] **Sadouki H.**, *L'effet de paroi, son influence sur les propriétés du béton superficiel*, Chantier, 18, pp 525 - 529, Suisse, Juin, **1987**.
- [Saetta93] **Saetta A. V., Scotta R. V., Vitaliani R. V.**, *Analysis of Chloride Diffusion into Partially Saturated Concrete*, ACI Materials Journal, 90 (5), pp 441 - 451, **1993**.
- [Saetta95] **Saetta A. V., Schrefler B. A., Vitaliani R. V.**, *2-D Model for carbonation and moisture/heat flow in porous materials*, Cement and Concrete Research, 25, 1703-1712, **1995**.
- [Saetta03] **Saetta A. V., Vitaliani R. V.**, *Experimental investigation and numerical modelling of carbonation process in reinforced concrete structures Part I : theoretical formulation*, Cement and Concrete Research, 9 p., Padova, Italie, Septembre, **2003**.
- [Sakata83] **Sakata K.**, *A study on moisture diffusion in drying and drying shrinkage of concrete*, Cement and Concrete Research, Vol. 13, pp 216 - 224, **1983**.
- [Samaris05] **Denarié E., Brühwiler E., Znidaric A., Houst Y., Rohleder R.**, *Full scale application of UHPFRC for the rehabilitation of bridges - from the lab to the field. in European project 5th FWP / SAMARIS - Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructures*, SAMARIS D22, WP 14: HPFRCC, <http://samaris.zag.si/>, 60 p., **2005**.
- [Samson99] **Samson E., Marchand J.**, *Numerical Solution of the Extended Nernst-Planck Model*, 215, 1-8, Laval, Canada, **1999**.
- [Samson99a] **Samson E., Marchand J., Robert J. L., Bournazel J.-P.**, *Modelling ion diffusion mechanisms in porous media*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 46, 2043-2060, Laval, Canada, **1999**.
- [Samson99b] **Samson E., Marchand J., Beaudoin J. J.**, *Describing ion diffusion mechanisms in cement-based materials using the homogenization technique*, Cement and Concrete Research, Pergamon, 29, 1341-1345, Laval, Canada, **1999**.
- [Samson99c] **Samson E., Lemaire G., Marchand J., Beaudoin J. J.**, *Modelling chemical activity effects in strong ionic solutions*, 15, 285 - 294, Québec, Canada, January, **1999**.
- [Samson00] **Samson E., Marchand J., Beaudoin J. J.**, *Modelling the influence of chemical reactions on the mechanisms of ionic transport in porous materials*, Cement and Concrete Research, Pergamon, 30, 1895-1902, Laval, Canada, **2000**.
- [Samson02] **Samson E., Marchand J., Maltais Y.**, *Modelling ionic diffusion mechanisms in saturated cement-based materials- an overview*, Transport in cement-based materials, 97-111, Canada, **2002**.
- [Samson03] **Samson E., Marchand J., Snyder K. A.**, *Calculation of ionic diffusion coefficients on the basis of migration test results*, materials and structures, 36, 156-165, Canada, **2003**.
- [Samson04] **Samson E., Marchand J., Snyder K. A., Beaudoin J. J.**, *Modeling ion and fluid transport in unsaturated cement systems for isothermal conditions*, 31 p., Québec, Canada, June, **2004**.
- [Sanberg78] **Sandberg U.**, *Spray protectors testing of efficiency*, VTI Rapport, 171 A, 75 p., Linköping, Suède, **1978**.
- [Sandberg79] **Sandberg U.**, *Efficiency of spray protectors*, VTI Rapport, 199A, 82 p., Linköping, Suède, **1979**.
- [Sanberg80] **Sandberg U.**, *Improved spray protectors for commercial vehicles - an approach to increase traffic safety*, Academic Press, Human factors in transport research, 1, pp 194 - 202, Linköping, Suède, **1980**.

[Sandberg95] **Sandberg P., Pettersson K. H., Sorensen H. E., Arup H.**, *Critical chloride concentration for the onset of active reinforcement corrosion*, RILEM International Workshop on Chloride Penetration into Concrete, Saint-Rémy-les-Chevreuse, October 15 - 18, **1995**.

[Saouma03] **Saouma V. E., Chang S.-Y.**, *Numerical simulation of reinforced concrete deterioration due to steel corrosion, freezing-thawing and mechanical load effects*, IBMAS Workshop, Department of Civil, Environmental, & Architectural Engineering University of Colorado, Boulder, CO. (USA), 8 p., Lausanne, Suisse, mars, **2003**.

[Sarlos02] **Sarlos G., Haldi P.-A., Verstraete P.**, *Systèmes énergétiques. Offre et demande d'énergie : méthodes d'analyse*, Presse Polytechnique et Universitaires Romandes, Traité de Génie Civil, 21, 874 p., Lausanne, Suisse, **2002**.

[Scherrer85] **Scherrer H. U.**, *Einsturz zum Unfall im Hallenbad Uster*, Schweizer Ingenieur und Architekten, n° 26, pp 649, **1985**.

[Schiegg02] **Schiegg Y.**, *Online-Monitoring zur Erfassung der Korrosion des Bewehrung von Stahlbetonbauten*, ETHZ, Thèse de doctorat, Nr 14583, 193 p., Zürich, Suisse, **2002**.

[Schiegg02a] **Schiegg Y., Böhni H., Hunkeler F.**, *Online-Monitoring of Corrosion in Reinforced Concrete Structures*, FIB, Proceedings of the 1st fib Congress, pp 49 - 58, Zurich, Switzerland, **2001**.

[Schiegg04] **Schiegg Y., Böhni H., Hunkeler F.**, *Online-monitoring zur Erfassung der Korrosion der Bewehrung von Stahlbetonbauten*, Office fédéral des routes, 581, 194 p., Zurich, Suisse, Juillet, **2004**.

[Schiessl76] **Schiessl P.**, *Zur Frage der zulässigen Rissbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung des Karbonatisierung des Betons*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 255, 1-175, Berlin, Allemagne, **1976**.

[Schiessl86] **Schiessl P., Schwarzkopf M.**, *Chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton.*, Betonwerk und Fertigteil-Technik 52, N° 10, pp 626 - 635, **1986**.

[Schiessl88a] **Schiessl P., Raupach M.**, *Chlorid induzierte Korrosion von Stahl in Beton*, Beton - Informationen 28, N° 3 - 4, pp 33 - 45, **1988**.

[Schiessl90] **Schiessl P., Raupach M.**, *Einfluss der Betonzusammensetzung und der Umgebungsbedingungen auf die chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton - Ergebnisse von Untersuchungen mit Betonkorrosionszellen.*, Beton - Informationen 30, N° 4, pp 43 - 54, Germany, **1990**.

[Schiessl91a] **Schiessl P., Raupach M.**, *Macrocell steel corrosion in concrete caused by chlorides.*, Second CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, (Ed. V. M. Malhotra), pp 565 - 583, Montréal, Canada, **1991**.

[Schiessl94] **Schiessl P., Breit W.**, *Dauerhaftigkeit örtlicher Instandsetzungen von Schäden durch Bewehrungskorrosion im Stahlbetonbau*, Forschungsbericht Nr. F 258, Institut für Bauforschung, Aachen, **1992**.

[Schiessl94a] **Schiessl P., Breit W.**, *Untersuchungen über den kritischen, korrosionsauslösenden Chloridgehalt.*, Forschungsbericht Nr. F 355, Institut für Bauforschung, **1994**.

[Schiessl95] **Schiessl P., Breit W.**, *Untersuchungen zum kritischen, korrosionsauslösenden Chloridgehalt.*, Forschungsbericht Nr. F 333, Institut für Bauforschung, Aachen, **1995**.

[Schiessl96] **Schiessl P., Breit W.**, *Local repair measures at concrete structures damaged by reinforcement corrosion*, Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction. Fourth International Symposium, (Ed. C. L. Page, P. B. Bamforth, J. W. Figg), Cambridge, UK, July 1- 4, **1996**.

[SchmidtDohl99] **Schmidt-Döhl F., Rostasy F. S.**, *A model for the calculation of combined chemical reactions and transport processes and its application to the corrosion of mineral-building materials Part I. Simulation model*, Elsevier Science Ltd., Part I Simulation model, pp 1039 -1045, Braunschweig, Germany, **1999**.

[SchmidtDohl99a] **Schmidt-Döhl F., Rostasy F. S.**, *A model for the calculation of combined chemical reactions and transport processes and its application to the corrosion of mineral- building materials Part II. Experimental verification*, Elsevier Science Ltd., Part II Experimental verification, pp 1048 - 1053, Braunschweig, Germany, **1999**.

[Sergi92] **Sergi G., Yu S. W., Page C. L.**, *Diffusion of chloride and hydroxyl ions in cementitious materials exposed to a saline environment*, Magazine of Concrete Research, No. 158, 44 , 63-69, Birmingham, Angleterre, **1992**.

[Sevruk86] **Sevruk B.**, *Correction of Precipitation Measurements*, ETHZ - Geographisches Institut, 23, 288 p., Zürich, Suisse, **1986**.

[Shin01] **Shin C. B. , Kim E. K.**, *Modelling of chlorid'ion ingress in coastal concrete*, A. A. Balkema, 32, 757 - 762, South Korea, december, **2001**.

[Siemes98] **Siemes T., Polder R., Vries H.**, *Design of concrete structures for durability*, Heron, 43, 227-245, Rijswijk, Netherland, **1998**.

[Silver] *The Point Pleasant / Silver Bridge Disaster*, <https://filebox.vt.edu/users/aschaeff/silver/silver.html>.

[Smolczyk84] **Smolczyk H.-G.**, *Flüssigkeit in den Poren des Betons - Zusammensetzung und Transportvorgänge in der flüssigen Phase des Zementsteins*, Beton - Informationen 24, N° 1, pp 3 - 11, **1984**.

[Spiegel81] **Spiegel M. R.**, *Probabilités et statistique: Cours et problèmes*, McGraw-Hill., New York, Etats-Unis, **1981**.

[Stanish02] **Stanish K., Thomas M.**, *The use of bulk diffusion tests to establish time-dependant concrete chloride diffusion coefficients*, cement and concrete research, Toronto, Canada, july, **2002**.

[Stark84] **Stark D.**, *Determination of permissible chloride levels in prestressed concrete*, Technical report Nr. 3, Prestressed Concrete Institute, **1984**.

[Stewart98a] **Stewart M. G., Rosowsky D. V.**, *Time-dependent reliability of deteriorating reinforced concrete bridge decks*, Structural Safety, 20, pp 91 - 109, **1998**.

[Stewart03] **Stewart M. G., Faber M. H., Gehlen C.**, *Temporal and spatial aspects of probabilistic corrosion models*, The third International IABMAS Workshop on Life-Cycle Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems, 269 - 278, Lausanne, Suisse, march, **2003**.

[Stratful75] **Stratful R. F., Jurkovich W. J., Spellmann D. L.**, , *Transportation Research Record* 539, 50, **1975**.

[Sudret05] **Sudret B., Defaux G., Pendola M.**, *Time-variant finite element reliability analysis - application to the durability of cooling towers*, Elsevier applied science publishers, Structural safety 27, pp 93 - 112, **2005**.

[Sugiyama03] **Sugiyama T., Ritthichauy W., Tsuji Y.**, *Simultaneous transport of chloride and calcium ions in hydrated cement systems*, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol 1, N°2, pp 127 - 138, July, **2003**.

[Suter89] **Suter R., Favre R.**, *La protection cathodique dans la maintenance des ouvrages d'art*, EPFL - IBAP, n° 132, 8 p., Lausanne, Suisse, **1989**.

[Taheri98] **Taheri-Motlagh A.**, *Durability of reinforced concrete structures in Aggressive marine environment*, Delft University of Technology, 194, Delft, Hollande, novembre, **1998**.

[Tanaka02] **Tanaka Y., Fujita M., Cheong H., Watanabe E., Kawano H.**, *Chloride permability of high-strength concrete*, Durability of Concrete Structures, first fib congress, pp 145 - 154, September, **2002**.

[Tang00b] **Tang L., Utgenannt P.**, *Characterization of chloride environment along a highway*, Fifth CanMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, 213223 p., Barcelone, Espagne, june, **2000**.



[Tang93] **Tang L., Nilsson L.-O.**, *Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars*, Concrete research, 23, pp 247 - 253, **1993**.

[Tang95] **Tang L.**, *A windows program for the prediction of chloride penetration into submerged concrete*, Chloride penetration into concrete, Rilem proceedings, 206-215, St-Rémy-les-Chevreuse, France, **1995**.

[Tang95a] **Tang L., Nilsson L.-O.**, *A new approach to the determination of pore distribution by penetrating chlorides into concrete*, cement and concrete research, 25, 695 - 701, U.S.A., february, **1995**.

[Tang96] **Tang L.**, *Chloride transport in concrete - Measurements and Prediction*, Chalmers University, P-96:6 Abr. Nr. 546, Göteborg, Sweden, **1996**.

[Tang96b] **Tang L., Nilsson L.-O.**, *Concrete structures under seawater by a numerical approach*, Durability of building materials and components, 7, Stockholm, Suède, May, **1996**.

[Tang96c] **Tang L., Nilsson L.-O.**, *Service life prediction for concrete structures under seawater by a numerical approach*, Durability of building materials and components 7, One, May, **1996**.

[Tang99] **Tang L.**, *Concentration dependance of diffusion and migration of chloride ions part 1. and part. 2*, cement and concrete research, 29, 1463 - 1468, U.K., **1999**.

[Taylor86] **Taylor H. F. W.**, *Chemistry of Cement Hydration*, Proceeding Int. Cong. On the Chem. Of Cement, 1, 82, **1986**.

[Thaler01] discussion téléphonique avec M. **Thaler** du service des routes du canton des Grisons, septembre 2001.

[Thomas90] **Thomas M. D. A., Matthews J. D., Haynes C. A.**, , *Corrosion of Reinforcement in Concrete* (eds C. L. Page, K. W. I. Treadway and P. B. Bamforth), Elsevier Applied Science, p. 198, London, **1990**.

[Thomas96] **Thomas M.**, *Chloride thresholds in marine concrete*, Cement and Concrete Research, N° 4, pp 513 - 519, **1996**.

[Thomas02] **Thomas A.**, *Etat des connaissances. Corrosion des aciers dans le béton.*, Oxand SA, 65 p., Montigny-sur-Loing, France, Août, **2002**.

[Tikalsky05] **Tikalsky P. J., Pustka D., Marek P.**, *Statistical variations in chloride diffusion in concrete bridges*, ACI Structural Journal, Title no. 102-S49, pp 481-486, May-June, **2005**.

[Tobola04] mise à disposition de différents plans d'ouvrage par l'intermédiaire de monsieur **J. Tobola**, du service des Routes Nationales du canton du Valais.

[Tobola05] discussion téléphonique avec M. **J. Tobola**, du service des Routes Nationales du canton du Valais.

[Torrent92] **Torrent R.**, *A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site*, Materials and Structures, Vol. 25, pp 358-365, **1992**.

[Treadaway89] **Treadaway K. W. J., Cox R. N., Brown B. L.**, *Proceeding inst. Civil Engineers*, Part1, 86, 305, **1989**.

[Truc00] **Truc O., Ollivier J. P., Nilsson O.**, *Multi species transport in saturated cement-based materials*, RILEM, proceeding PRO 19, edited by C. Andrade and J. Kropp, Pro 19, 14, Toulouse, France, September, **2000**.

[Truc00a] **Truc O., Ollivier J. P., Nilsson L.-O.**, *Numerical simulation of multi-species transport through saturated concrete during a migration test-MSDiff code*, Cement and Concrete Research, Pergamon, 30, 1581-1592, Toulouse, France, **2000**.

[Tumidajski95] **Tumidajski P. J., Chan G. W., Feldmann R. F., Strathdee G.**, *A Boltzmann-Matano analysis of chloride diffusion*, cement and concrete research, 25, 1556 - 1566, Canada, february, **1995**.

[Tumidajski96] **Tumidajski P. J.**, *Application of Danckwerts solution to simultaneous diffusion and chemical reaction in concrete*, Cement and Concrete Research, 26, 697-700, **1996**.

[Tuutti82] **Tuutti K.**, *corrosion of steel in concrete*, Swedish Cement and Concrete Research Institute Ed., Stockholm, **1982**.

[Tuutti93] **Tuutti K.**, *Effect of cement type and different additions on service life*, Concrete 2000 (eds. R. K. Dhir and M. R. Jones), E and FN Spon, Vol 2, pp 1285 - 1295, London, September 7 - 9, **1993**.

[Ungricht02] **Ungricht H., Hunkeler F., Böhni H.**, *Chloride ingress into concrete under natural alternating exposure conditions*, Congrès à Hanoi 2002, 8 p., Zurich, Suisse, Octobre, **2002**.

[Ungricht04] **Ungricht H.**, *Wasserhaushalt und Chlorideintrag in Beton – Einfluss der Exposition und der Betonzusammensetzung*, ETHZ, Nr 15758, 187 p., Zurich, Suisse, **2004**.

[Val98] **Val D. V., Stewart M. G., Melchers R. E.**, *Effect of reinforcement corrosion on reliability or highway bridges*, Elsevier applied science publishers, Engineering structures, Vol. 20, N° 11, pp 1010 - 1019, **1998**.

[Val03] **Val D. V., Stewart M. G.**, *Life-cycle cost analysis of reinforced concrete structures in marine environments*, Elsevier applied science publishers, Structural Safety 25, pp 343 - 362, **2003**.

[vanBreugel00a] **van Breugel K.**, *Resistance of lightweight aggregate concrete against chloride penetration under simulated marine exposure conditions*, Proc. 2nd. Int. Symp. On Structural Lightweight Aggregate Concrete, pp 255 - 262, June, **2000**.

[Vassie84] **Vassie P.**, *Reinforcement corrosion and the durability of concrete bridges*, Proceeding of the Institution Civil Engineers 76, pp 713 - 723, August, **1984**.

[Vénuat69] **Vénuat M., Alexandre J.**, *De la carbonatation du béton*, Revue des matériaux de construction, 638, 1-50, Paris, France, **1969**.

[Vénuat97] **Vénuat M., Alexandre J.**, *De la carbonatation du béton*, Centre d'études et de recherches de l'industrie des liants hydrauliques., 638, France, **1997**.

[Vezina98] **Vézina D.**, *Corrosion des aciers d'armature : Situation et recherche des solutions au ministère des Transports du Québec*, Colloque du secteur de Montréal de NACE, Québec, Canada, **1998**.

[VonMoos02] **von Moos Stahl**, *Top 12, der neue Betonstahl mit hohem Korrosionwiderstand*, von Moos Stahl, 4 p., Emmenbrücke, Suisse, **2002**.

[Vu00] **Vu K. A. T., Stewart M. G.**, *Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models*, Elsevier applied science publishers, Structural Safety 22, pp 313 - 333, **2000**.

[West85] **West R. W., Hime W. G.**, *Chloride profiles in salty concrete*, Materials Performance 24, N° 7, pp 29 - 36, **1985**.

[Weibel85] **Weibel J.-P.**, *Après la catastrophe d'Uster : et nous ?*, Ingénieurs et architectes suisses, n° 14, **1985**.

[Wiens98] **Wiens U.**, *Einfluss von Steinkohlenflugasche auf die chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton*, Dissertation, Aachen, **1998**.

[Wittmann89] **Wittmann X., Sadouki H., Wittmann F. H.**, *Numerical Evaluation of Drying Test Data*, SMIRT 10, 10th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, Vol. H, pp 71-79, Anaheim, USA, August, **1989**.

[Xi94] **Xi Y., Bazant Z., Jennings H. M.**, *Moisture Diffusion in Cementitious Materials - Adsorption Isotherms*, Advanced Cement Based Materials, Vol. 1, pp 248-257, USA, **1994**.

[Xi94a] **Xi Y., Bazant Z., Jennings H. M., Molina L.**, *Moisture Diffusion in Cementitious Materials - Moisture Capacity and Diffusivity*, Advanced Cement Based Materials, Vol. 1, pp 2258-266, USA, **1994**.

- [Xi99] **Xi Y., Bazant Z. P.**, *Modelling chloride penetration in saturated concrete*, Journal of Materials in Civil Engineering, 58-65, Colorado, U.S.A., février, **1999**.
- [Xi00] **Xi Y., Willam K., Frangopol D. M.**, *Multiscale modelling of interactive diffusion process in concrete*, Journal of Engineering Mechanics, 258-265, Colorado, USA, mars, **2000**.
- [Ye02] **Ye G., Hu J., van Breugel K., Stroeven P.**, *Characterization of the development of microstructure and porosity of cement-based materials by numerical simulation and ESEM image analysis*, Materials and Structures, 35, pp 603 - 613, December, **2002**.
- [Yonezawa88] **Yonezawa T., Ashworth V., Procter R. P. M.**, Corrosion 44, 489, **1988**.
- [Yu93] **Yu S. W., Sergi G., Page C. L.**, *Ionic diffusion across an interface between chloride-free and chloride-containing cementitious materials*, Magazine of Concrete Research, 45, 257-261, **1995**.
- [Yunovich00] **Yunovich M., Thompson N. G., Vanyos T. B., Lave L.**, *Highway Bridges*, <http://www.corrosioncost.com/infrastructure/highway/index.htm>.
- [Zagar55] **Zagar L.**, *Die Grundlagen zur Ermittlung der Gasdurchlässigkeit von feuerfesten Baustoffen*, Archiv für das Eisenhüttenwesen, Vol. 26, No. 12, pp 777 - 782, **1955**.
- [Zambelli98] **Zambelli M.**, *Implantation d'une installation fixe d'aspersion automatique de fondant chimique sur l'autoroute de contournement de Lausanne*, Xème Congrès International de la Viabilité Hivernale de l'AIPCR, Volume 2, pp 463 - 475, Lausanne, Suisse, **1998**.
- [Zaugg04] **Zaugg M.**, *Effet du microclimat sur la corrosion des éléments en béton armé*, Interne, Travail de diplôme au MCS, 47 p., Lausanne, Suisse, février, **2004**.
- [Zhang05] **Zhang T., Samson E., Marchand J.**, *Effect of temperature on ionic transport properties of concrete*, Simco Technologies Inc, Quebec, 11 p., Québec, Canada, **2005**.
- [Zienkiewicz71] **Zienkiewicz O. C.**, *The Finite Element Method in Engineering Science*, McGraw-Hill - London, 521 p., Swansea, Angleterre, **1971**.
- [Zemdrain02] **Rauh AG**, *Nappes de coffrage à perméabilité contrôlée (CPF) pour une meilleure durabilité de la surface du béton*, Rauh Betonschalungen AG, 31 p., Uetendorf, Suisse, Septembre, **2002**.
- [Zraggen84] **Zraggen A.**, *Der Millionen-Pfusch - Abgebrochen*, article paru dans le magazine "Das Gelbe Heft", Suisse, **1984**.
- [Zimmermann00] **Zimmermann L.**, *Korrosionsinitiierender Chloridgehalt von Stahl in Beton*, ETHZ, Nr. 13870, Zürich, **2000**.
- [Zuber02] **Zuber B.**, *Vers une modélisation du comportement des matériaux cimentaires exposés au gel*, Faculté des Etudes Supérieures de l'Université Laval, 228 p., Québec, Canada, décembre, **2002**.



## Annexe A: Etat des connaissances

*L'état des connaissances est orienté sur les bases fondamentales, tirées de la littérature, pour le développement de ce travail de recherche. Les sujets sont très variés puisqu'il touche à la météorologie, à la microstructure dans les bétons, à la modélisation non linéaire, à la conception et réalisation d'essais en laboratoire et à la modélisation d'une approche probabiliste. Ces deux derniers sont développés aux chapitres § 3.2 et § 4.*

*L'approche du microclimat (§ 2) est débutée par une approche du climat à l'échelle planétaire pour se focaliser finalement sur le climat Suisse (§ A.1). La présence de produit chimique sur les chaussées est agrémentée d'argumentations sur la politique d'épandage, le choix de produits de déverglaçage, leur efficacité, leur quantité (§ A.2). Finalement l'exposition permet la prise en considération de la variabilité spatiale du microclimat et de la présence de produit chimique en surface du béton pour toutes les parties de l'ouvrage (§ A.3). Ce chapitre permet au concepteur d'ouvrages d'obtenir quelques valeurs de base de climat pour des conceptions futures.*

*La microstructure du béton est expliquée afin de mettre en évidence la formation des pores capillaires dans le béton et de mieux comprendre la définition de le béton d'enrobage (§ A.4). Les modèles de transport (§ 3) sont introduits exposant certains modèles existants et en explicitant les phénomènes chimiques et physiques s'y rapportant (§ A.5).*

*Finalement, un état de l'art de la corrosion des aciers complète ce chapitre pour prendre en considération, si nécessaire une réduction de la section des aciers d'armature et la sécurité structurale restante d'un ouvrage (§ A.6). Cet élément ne sera pas repris ultérieurement.*

### A.1 Caractérisation d'un climat

A l'échelle planétaire, la grande quantité d'eau, provenant des océans et des mers, ainsi que le soleil influencent de manière prépondérante le climat. Dans les couches les plus proches du sol (la troposphère puis la stratosphère), des masses d'air, tantôt humides, tantôt sèches, tantôt chaudes et tantôt froides, se déplacent formant ainsi des climats différents sur la terre. L'inclinaison variable de la terre par rapport au soleil, la rotation de la terre autour de ce dernier sous forme elliptique, la rotation de la terre sur elle-même et la texture non uniforme à sa surface induisent des gradients de pression et des gradients thermiques dus essentiellement à l'énergie solaire. Les courants atmosphériques permettent d'adoucir ces gradients. Sans cela, la terre serait terriblement chaude en certaines régions et terriblement froide en d'autres zones.

Situé sur le tropique du Cancer, le climat suisse se distingue par quatre saisons différentes au cours d'une année : le printemps, l'été, l'automne et l'hiver. Le printemps et l'automne sont deux périodes transitoires entre la période chaude et sèche de l'été et la période froide et humide de l'hiver. A ce climat, gouverné par la latitude s'ajoute pour la Suisse des climats montagnards, gouvernés par l'altitude, et s'apparentant plus ou moins aux climats polaires [Caron95].

#### A.1.1 Energie solaire

L'intensité du rayonnement solaire dépend de l'angle d'incidence des rayons solaires par rapport à la surface terrestre, aux absorptions, aux réflexions dues à la présence de gouttelettes et d'autres substances en suspension dans l'atmosphère. Outre le réchauffement de la croûte terrestre, l'énergie solaire est à l'origine de l'énergie éolienne et de la formation de nuages par évaporation de l'eau des océans, des mers et autres plans d'eau (Figure A.1).

Dans nos régions, les durées quotidiennes de lumière varient tout au long de l'année. Ceci du à la variation de l'inclinaison de la terre par rapport au soleil. Les durées quotidiennes de la lumière s'allongent lors des périodes estivales et atteignent un maximum au solstice d'été : le 21 juin (par exemple 15h56 de lumière à Zurich en 2004) et diminuent durant les périodes hivernales pour atteindre un minimum au solstice d'hiver : le 21 décembre (par exemple 8h28 de lumière à Zurich en 2004) [Astro04]. La petite taille du territoire suisse permet d'observer des durées équivalentes de lumière sur tout le ter-

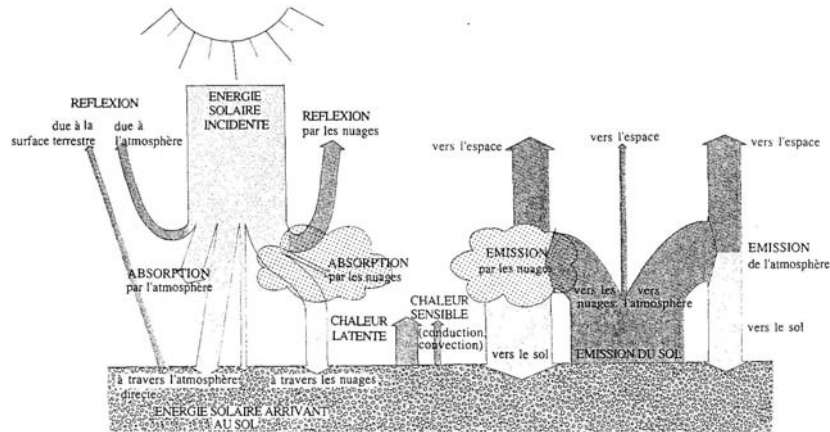


FIGURE A.1: Répartition des quantités d'énergie d'origines externes arrivant à la surface du globe ou en repartant (la largeur des flèches est proportionnelle aux quantités d'énergie) [Caron95].

ritoire. Cette durée d'insolation journalière influence la température de l'air et du sol durant les quatre saisons.

L'altitude influence la température de l'air et du sol (Figure A.2). La température diminue en fonction de l'augmentation en altitude. Son gradient dépend essentiellement du mouvement des masses d'air local ou à l'échelle planétaire. La combinaison de l'intensité du rayonnement solaire et du temps d'insolation gouverne également la température de l'air et du sol (Annexe B.1). L'intensité du rayonnement solaire est plus importante en haute altitude qu'en plaine où le rayonnement est filtré. Les durées d'insolation sont influencées par la durée de lumière quotidienne, par la présence de nuages ou par la présence d'obstacles (collines, montagnes, etc.).

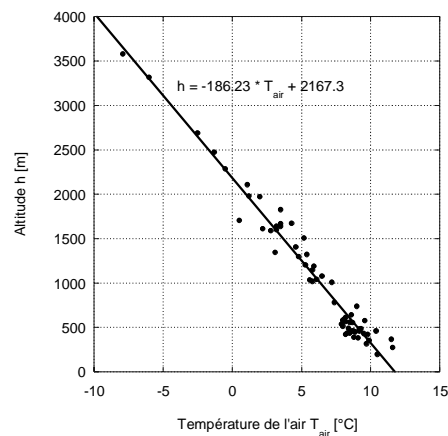


FIGURE A.2: Influence de l'altitude sur les températures moyennes annuelles (moyennées sur les années 1961 - 1990), données brutes fournies par l'institut suisse de météorologie et des stations météorologiques ANETZ.

L'ensoleillement joue aussi un rôle particulier dans les cuvettes comme en Haute-Engandine dans le canton des Grisons. Durant la journée, le sol s'échauffe lentement par le rayonnement solaire. La nuit, sans vent, le sol se refroidit tranquillement, l'air chaud plus léger s'élève dans l'atmosphère, tandis que les couches d'air froides en altitude plus lourdes s'écoulent lentement au fond de la cuvette où elles restent prisonnières. Il y a ainsi une inversion de température, car la température de l'air au fond de la cuvette est plus froide que celle des couches supérieures [Dysli91].

Les brouillards persistants sur le plateau suisse, surtout durant les périodes hivernales, engendrent des durées d'insolation et des intensités d'ensoleillement faibles au niveau de la Suisse. Ces brouillards persistants sont emprisonnés entre les Alpes, le Jura et les massifs de la Forêt-Noir, avec pour exutoires

les régions de Bâles et de Genève. Sur les parties du Jura, de la région lémanique et des Préalpes, une situation intermédiaire entre le plateau suisse et les vallées alpines règne par rapport aux durées d'insolation et aux intensités d'ensoleillement. Dans les vallées alpines des cantons des Grisons, du Tessin et du Valais, on enregistre les durées d'insolation les plus importantes de Suisse avec des intensités d'ensoleillement hautes, mais toutefois inférieures à celles mesurées à haute altitude. Ces vallées alpines sont protégées des brouillards persistants et des intempéries par une barrière montagneuse. Sur les sommets montagneux alpins soit supérieurs à 2000 mètres d'altitude, l'intensité de l'ensoleillement est très importante, car le rayonnement solaire n'est que peu filtré, absorbé et réfracté par l'atmosphère. Par contre, la durée d'insolation est plus modeste. Souvent, après le passage d'une perturbation, des brouillards de traîne peuvent persister en montagne et sur les sommets (Tableau A.1, Annexe B.1).

Régions	Intensité d'ensoleillement [W/m <sup>2</sup> ]	Durée d'insolation [%]
Plateau suisse	120 à 127	33 à 39
Arc lémanique, Jura et les Préalpes	128 à 140	40 à 45
Vallées alpines canton des Grisons cantons du Valais et du Tessin	141 à 154	46 à 50
Sommets alpins	> 154	46 à 50

TABLEAU A.1: Intensité et durée d'insolation annuelle, moyennée sur une trentaine d'années, données brutes [MétéoSuisse04]

### A.1.2 Energie géothermique

Le flux de chaleur, apporté par le manteau terrestre, n'influence que peu la température de surface du sol. L'énergie du rayonnement solaire est d'environ 150 [W/m<sup>2</sup>], tandis que l'énergie géothermique est d'environ 0,05 [W/m<sup>2</sup>] (Figure A.3). Toutefois, cette énergie fournit à la croûte terrestre une bonne inertie thermique. Elle se perçoit dans de nombreux cas, par la formation plus rapide du verglas sur des chaussées de ponts que sur des chaussées sur terrain naturel [Boschung96].

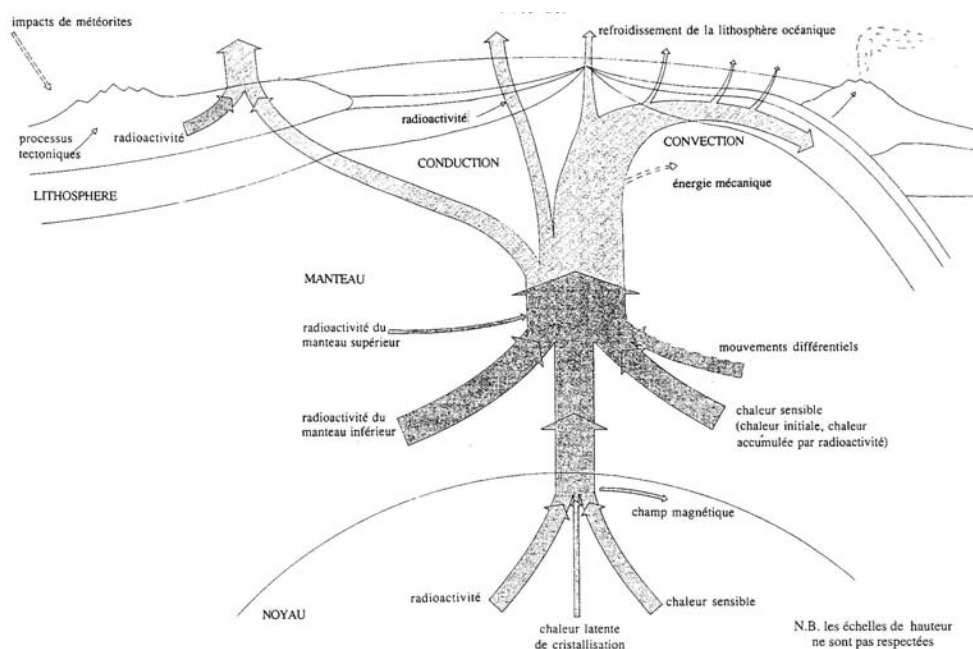


FIGURE A.3: Bilan énergétique interne (la largeur des flèches est proportionnelle aux flux) [Caron95].

### A.1.3 Energie éolienne

Le vent permet de réguler les températures à la surface du globe. L'air chaud, s'élevant dans les régions équatoriales, est remplacé par de l'air plus froid provenant des zones polaires. S'ajoutant aux

effets de rotation de la terre, aux différences de pression, à l'influence des grands courants marins et des barrières montagneuses, l'air s'écoule en rotation vers l'est dans l'hémisphère nord [Sarlos02].

Un vent, rencontrant un obstacle tel qu'une chaîne de montagne ou une colline, va la contourner par le côté et par le dessus. Cet obstacle réduit la section de passage. La vitesse du vent est alors amplifiée à l'amont de l'obstacle afin que le débit soit conservé. L'augmentation de vitesse du vent s'observe également dans un rétrécissement de vallée ou sur un col, où les rafales peuvent être très importantes. A l'aval de l'obstacle, il arrive fréquemment que les filets se décollent du relief suite au passage de la crête, provoquant en aval une zone de turbulences. Si la zone de turbulence est importante, ceci peut induire des vents ascendants sur le versant aval [Hertig99].

Des effets thermiques engendrent également des déplacements d'air plus localisés, tel observé dans les régions à proximité d'un plan d'eau ou dans les zones montagneuses. Pendant la journée, l'eau, ayant une bonne inertie thermique, est plus froide que la terre. Il s'établit ainsi un vent, s'écoulant du plan d'eau vers la terre. La nuit, par contre, le sol se refroidit très rapidement. Le flux d'air est alors inversé, les masses d'air s'écoulent de la terre vers le plan d'eau. En montagne, les mêmes flux se produisent. Durant la nuit, les effets de cuvettes (§ A.1.1) induisent un écoulement des masses d'air froid des montagnes vers les vallées (vent de montagne). Puis pendant la journée, le sol en plaine s'échauffe moins rapidement qu'en altitude du à la stagnation d'air froid durant la nuit, il s'instaure ainsi un déplacement de masses d'air de la plaine vers les hauteurs (vent de vallée) [Sarlos02].

Deux types de vent peuvent influencer le climat d'une région,

- la brise, due à des échanges thermiques,
- et les vents générés par des différences de pression observée à grande échelle, comme la bise, vent froid venant du nord, le foehn, vent chaud venant du sud, le vent d'ouest, vent humide et le vent d'est, vent sec.

L'orographie suisse joue un rôle primordial avec les chaînes des Alpes et du Jura. L'influence moyenne du vent reste faible sur le plateau suisse et dans les cantons du Tessin et du Valais. Son importance augmente sur la chaîne du Jura, dans le canton des Grisons et dans la zone de Martigny, petite région particulière en Valais exposée à la brise. Son influence devient très importante à haute altitude dans les Alpes (Tableau A.2, Annexe B.2).

Régions	Vitesse du vent
Plateau suisse et les cantons du Tessin et du Valais	1.1 à 1.9
Chaîne du Jura et canton des Grisons	2 à 4
Sommets alpins	4 à 8

TABLEAU A.2: Moyenne annuelle de la vitesse du vent en [m/s], basée sur une trentaine d'années, données brutes de [MétéoSuisse04]

#### A.1.4 Précipitations

Le cycle de l'eau sur la terre s'initie par l'évaporation de l'eau des océans, des mers, des lacs et des surfaces provoquée par l'énergie solaire. La vapeur d'eau a une densité volumique inférieure à celle de l'air et s'élève dans l'atmosphère. A travers cette ascension, l'air humide subit une dépressurisation, provoquant une condensation. Ces gouttelettes d'eau forment les nuages. Les vents entraînent les masses d'air humide au-dessus des continents. Le relief des continents produit une élévation des masses d'air, provoquant une précipitation des gouttelettes sous forme d'eau, de neige ou même de glace. Cette eau précipitée s'achemine plus ou moins rapidement, selon qu'elle est piégée par des lacs ou par un réseau souterrain, sur le relief et s'évacue par l'intermédiaire de rivières et de fleuves en direction des mers et des océans. Ainsi le cycle se termine [Sarlos02].

Le franchissement de chaînes de montagnes ou d'obstacles par des nuages provoque des précipitations intenses sur la partie amont du relief. L'ascension sur cette partie refroidit le nuage, produisant une condensation et à des précipitations. De plus les turbulences, créées par le relief et imposant cette ascension, peuvent provoquer des précipitations. Sur la partie aval, l'air très humide se réchauffe moins rapidement et affecte cette région par des températures plus fraîches et une humidité relative plus



importante. Cependant, par air plus sec, le réchauffement est plus rapide, provoquant dans la région avale des températures plus chaudes, telles les situations de foehn (Figure A.4).

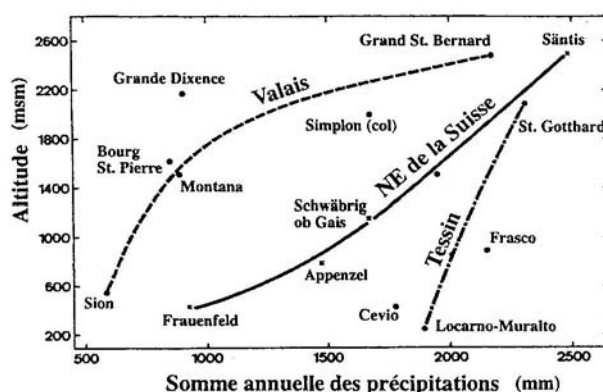


FIGURE A.4: L'augmentation de la quantité de précipitations avec l'altitude [Caron95].

De même, l'influence orographique joue un rôle primordial pour les vents humides provenant de l'ouest et du sud. Ainsi les vents d'ouest apportent d'abondantes précipitations sur les sommets montagneux, sur les chaînes du Jura, dans les Préalpes et sur les versants du nord des Alpes. Le plateau suisse est également touché par ces précipitations apportées par ces vents d'ouest. Les vents du sud, notamment le foehn, apportent des précipitations sur le versant sud des Alpes, comme dans le canton du Tessin. Par contre, les vents continentaux du nord et de l'est sont généralement plus secs et n'apportent que peu de précipitations (Tableau A.3, Annexe B.3). Quelques vallées alpines ne sont que peu influencées par ces précipitations, notamment dans les cantons des Grisons et du Valais, protégées par les chaînes de montagnes.

Régions	Hauteur d'eau précipitée	Humidité relative
Canton du Tessin	1300 à 1600	70 à 74
Plateau suisse	1000 à 1300	77 à 84
Cantons des Grisons et du Valais	<1000	70 à 74
Région lémanique	800 à 1200	70 à 78
Sommets alpins	>1600	70 à 78

TABLEAU A.3: Hauteur d'eau précipitée annuelle en [mm] et humidité relative moyenne annuelle en [%], moyennée sur une trentaine d'année, données brutes de [MétéoSuisse04]

### A.1.5 Le gaz carbonique

L'air contient environ 0.03% en volume de gaz carbonique qui est régulé principalement par le calcium contenu dans l'eau de mer. La concentration de gaz carbonique varie avec la température, la pression atmosphérique et le milieu telles les zones urbaines, les zones rurales, les zones en bordure d'axe routier, les tunnels routiers, les garages, les cheminées (Tableau A.4).

Milieux	Concentration de gaz carbonique
	[% volume]
Campagne	0.015
Centre ville	0.036
Zone industrielle	0.045
Sortie d'échappement du véhicule	16.69
Respiration humaine	3.62

TABLEAU A.4: Concentration de gaz carbonique dans différents milieux [Saetta03]

Les effets de l'activité industrielle ont provoqué une augmentation de la concentration de gaz carbonique de 30% depuis 1750. Par contre, la production en gaz carbonique provenant de l'activité industrielle s'élève à 7.5 milliards de tonnes par an. Sur un rythme identique cette valeur quintuplera dès la fin du prochain siècle. Néanmoins, compte tenu de la capacité d'absorption océanique, cette estimation ne signifie pas que la concentration de gaz carbonique augmentera d'autant [Chaussadent99].

#### **A.1.6 Les stations météorologiques**

L'office fédéral de météorologie et de climatologie [Météosuisse04] dispose d'un réseau principal ANETZ (Automatisches Netz der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt) de 72 stations sur sol helvétique, construites durant les années 1960 à 1970. D'autres stations complémentaires (ISM) comptent environ 700 stations et présentent des dates de mise en fonction plus récentes. Ces stations permettent de récolter des informations sur les vitesses et directions des vents, sur les températures de l'air et du sol, sur la durée et l'intensité du rayonnement solaire, sur le taux d'humidité dans l'air, sur les hauteurs de précipitations pluviales et nivales et sur les pressions barométriques de l'atmosphère [DeCesare03].

Un autre réseau, en pleine expansion durant ces dernières années, est celui de stations météorologiques disposées aux abords des autoroutes ainsi que sur les ponts et viaducs. Ce réseau de stations météorologiques autoroutières permet la surveillance et la planification d'interventions en périodes hivernales pour le déblaiement de la neige sur les chaussées ou pour l'épandage de produits de déverglage, afin d'éliminer la couche de verglas. Si par rapport aux stations météorologiques ANETZ, les capteurs de pressions barométriques de l'atmosphère sont omis, d'autres capteurs supplémentaires permettent la mesure du point de congélation sur la chaussée humide, la mesure de la température des chaussées et de la hauteur d'eau sur la chaussée [Boschung00E] [Bornand98].

### **A.2 Interventions en cas de verglas**

Durant les années 1960 - 1970, l'augmentation considérable du trafic routier a conduit les autorités à abandonner l'épandage de sable et de gravier (moyens abrasifs) sur les routes verglacées durant les périodes hivernales. Dans un premier temps, une mixture composée de sable et de chlorure de sodium fut épandue sur les chaussées, puis rapidement les chlorures de sodium ont remplacé les moyens abrasifs [Anita98]. Une trentaine d'année plus tard, l'utilisation des chlorures reste incontournable, mais l'apparition de dégâts sur les chaussées et sur les ouvrages a donné lieu à d'importantes recherches de produits de remplacement et à un épandage plus parcimonieux. Les chlorures de sodium sont parfois mélangés à des chlorures de calcium, pour le dégivrage de régions aux climats plus sévères comme pour les routes de cols exploitables en hiver. A l'heure actuelle, les moyens abrasifs ont une utilisation limitée pour de faibles densités de trafic et dans certaines régions de montagne où le climat rigoureux provoque une vitesse d'intervention longue.

#### **A.2.1 Le verglas**

Le verglas est une couche de glace se formant à la surface d'une route ou de toutes autres surfaces. Sur les chaussées, le verglas se produit lorsque la température à la surface du sol est à 0°C et lorsque de l'eau est présente sur cette dernière. Ainsi la formation du verglas dépend de la température de l'air, de la teneur en eau de l'air, de la température de l'eau de précipitations, de la température et de la capacité thermique de l'infrastructure, de la vitesse du vent et finalement de la concentration en produits de déverglage sur la chaussée. Elle peut subvenir avec un brouillard givrant, lorsque le taux d'humidité de l'air est proche de la saturation et sa température en-dessous de 0°C, par pluie verglaçante, lorsqu'il se produit une précipitation pluviale et la température du sol est très basse, avec des stagnations d'eau sur la chaussée, lorsque le séchage et/ou l'évacuation de l'eau de pluie sont différés et finalement avec l'eau de fonte de la neige accumulée sur le bord des chaussées [Dysli91].



FIGURE A.5: Véhicules de déblaiement de la neige, a) camion avec lame, chasse-neige, b) fraiseuse.

### A.2.2 Sécurité routière

Les autorités garantissent des routes praticables durant les périodes hivernales et ainsi assurent la sécurité des usagers à un niveau acceptable. Ce niveau de sécurité est un compromis entre les moyens dont disposent les autorités, la durée de la période hivernale régionale et la prise de risques acceptée par l'utilisateur. Les relations entre ces différents critères sont différentes pour chaque région. Les interventions sont fixées sur des tronçons de route bien établis où les alarmes sont fournies sur la base de zones critiques telles que des zones d'ombre, les ponts à faible inertie thermique, des zones à types de revêtements drainants, des zones préférentielles de passage du vent [Moritz98]. Les moyens mécaniques sont utilisés pour le déblaiement de la neige (chasse-neige, fraiseuse, Figure A.5) et sont souvent combinés aux moyens chimiques (épandage de produits de déverglaçage, Figure A.6). Dans les zones à forts tra-

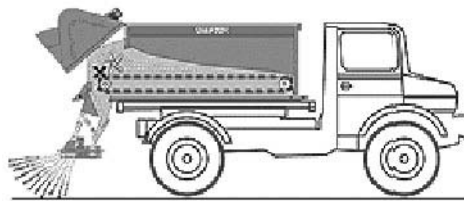


FIGURE A.6: Camion équipé d'une épandeuse à produits de déverglaçage.

ffics ou à interventions immédiates impossibles, ainsi que sur des points particuliers du réseau routier (pont, viaduc), d'autres méthodes sont parfois utilisées, comme le chauffage de la surface de roulement (procédé abandonné en Suisse pour cause de prix exorbitants) [Dysli91], ou les installations automatiques de salage [Boschung98A] [Dumont05] (Figure A.7).

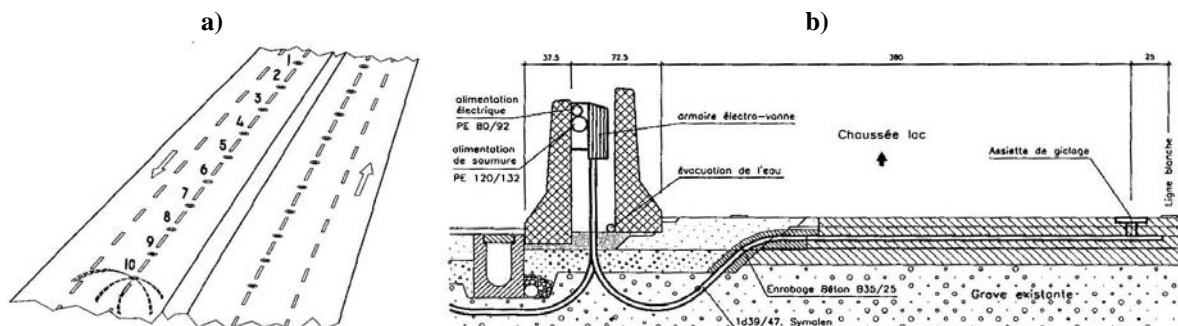


FIGURE A.7: Représentation d'un tronçon de route [Zambelli98], a) vue schématique de dix assiettes de giclage avec un giclage sur la dixième, b) profil en travers de la chaussée équipée avec une assiette de giclage.

### A.2.3 Gestion des alarmes et des interventions

L'épandage de produits de déverglaçage subit de grandes controverses. D'une part, les besoins civils assurent la continuation de l'épandage de produits de déverglaçage pour assurer la sécurité des usagers. D'autre part, des facteurs économiques et écologiques conduisent à la diminution conséquente de l'épandage de produits de déverglaçage sur la chaussée.

Devant ce dilemme de développement durable, la politique des autorités se situe entre ces deux extrêmes, soit assurer la sécurité requise en minimisant les impacts sur l'environnement. La diminution des impacts s'obtient par la fermeture de quelques tronçons de routes à faible trafic durant la période hivernale (route de col et autres routes secondaires), par l'acquisition d'équipements plus modernes nécessitant un épandage moins important et mieux dosé, par une intervention plus ciblée, grâce à l'implantation de station météorologique et à la mesure de l'état de la chaussée; et par des installations automatiques de salage [Boschung02].

Du à l'autonomie de gestion de chaque région et à leurs moyens à disposition variables, la politique de maintenance hivernal comporte une disparité. Ainsi le facteur humain garde une importance primordiale quant à la gestion de la sécurité des chaussées en période hivernale, aux décisions d'interventions sur une chaussée verglacée et au choix de la quantité de produits de déverglaçage épandus. Cependant, de plus en plus, l'assistance automatique des stations météorologiques et d'autres capteurs électroniques complètent l'expérience des autorités et des voyers.

### A.2.4 Epandage de produits de déverglaçage

L'utilisation de moyens abrasifs (sable) est limitée aux routes de desserte à vitesse réduite. Le bilan écologique et les coûts de recyclage des moyens abrasifs sont très lourds. Lorsque le sable et les gravillons sont évacués en bordure de chaussée, ils se chargent de matières polluantes, dont les métaux lourds. La décontamination nécessite des procédés très onéreux, telle l'utilisation des fourneaux des cimentiers [Hanke98] [Matin03].

Les fondants chimiques ont fait l'objet de nombreuses recherches [Eleroy98] [Anita98]. Les différences observées avec d'autres produits, voire avec des mélanges, montrent que les chlorures de sodium présentent aujourd'hui encore une bonne efficacité de fonte pour des prix avantageux.

Le chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ) est un produit efficace jusqu'à des températures de  $-8^\circ\text{C}$ . Sa chaleur latente étant moyenne, elle produit une efficacité de fusion pendant plusieurs heures. Le chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ) est un produit efficace à des températures inférieures à  $-8^\circ\text{C}$ . Par contre, sa chaleur latente plus élevée que les chlorures de sodium fournit une bonne efficacité pendant une courte période lorsqu'il est épandu sous forme solide. L'épandage sous forme de solution limite ce désagrément. Le prix des chlorures de calcium est de 2 à 4 fois plus cher que les chlorures de sodium. Ainsi, l'épandage de chlorure de calcium est moins fréquent. Ceci s'explique par une faible fréquence de précipitations nivales à températures inférieures à  $-8^\circ\text{C}$  en plaine. Par contre, en altitude, la récurrence des précipitations et des températures basses est fréquente.

L'acétate de magnésium, 20 fois plus cher que les chlorures de sodium, présente un bon effet de réduction de la corrosion avec cependant des caractéristiques de fontes légèrement inférieures aux chlorures de sodium. D'autres essais effectués avec un mélange de chlorure de sodium et d'acétate de magnésium n'ont pas donné la réduction de la corrosion escomptée. Ainsi, la Suède a abandonné la recherche sur ce type mélange. L'acétate de potassium présente des caractéristiques similaires à l'acétate de magnésium. Ce produit est d'ailleurs utilisé sur de nombreux aéroports [Anita98].

Le chlorure de sodium et, dans une mesure plus limitée, le chlorure de calcium restent les produits de déverglaçage les plus utilisés pour le dégivrage des chaussées son utilisation à long terme ne fait l'objet d'aucun débat.

### A.2.5 Quantité de produits de déverglaçage épandus

L'épandage de produits de déverglaçage s'effectue à la main (pour de petites zones : les places publiques) ou par des moyens mécaniques (camion épandeur, brouette avec épandeur à tourniquet).

Le produit est soit épandu à sec sous forme solide, soit sous forme de solution. L'épandage sous forme de solution présente l'avantage d'être dispersé de manière plus homogène sur la chaussée et d'agir plus rapidement. Même si le débit de l'épandeur gère la quantité en fonction de la vitesse du véhicule, la variabilité spatiale et temporelle reste importante et ce, d'autant plus, en période de précipitations. Cette variabilité dépend du type d'interventions (épandage préventif, épandage curatif en cas de verglas, épandage curatif en cas de précipitations nivales), de l'état de la chaussée (humide, sèche, bosselée) et des conditions climatiques (intensité des précipitations pluviales ou nivales, temps sec).

Les produits de déverglage s'évacuent plus ou moins rapidement selon les conditions climatiques et selon les dispositifs d'évacuation des eaux. Des essais en Suède [Blomqvist98] montrent qu'environ 10% des produits de déverglage persistent sur la chaussée après environ une semaine depuis l'instant d'épandage. Une autre possibilité de différer l'évacuation des produits de déverglage se situe dans les cas où les produits de déverglage sont emprisonnés dans les amas de neige se situant en bordure de chaussées, après déneigement [Brod92] [Laurinavicius98].

Suite à des discussions avec plusieurs voyers, la concentration de chlorure de sodium durant un épandage mécanique s'élève à environ 5 [g/m<sup>2</sup>] pour une intervention préventive, et à 10 [g/m<sup>2</sup>] pour une intervention curative [Lattion01]. Une autre source indique des fourchettes entre 5 et 30 [g/m<sup>2</sup>] dépendant de la température du sol, de la température de l'air, de la quantité de précipitation nivale et du taux de trafic [Thaler01]. Durant nos investigations effectuées sur le pont des Trappistes (§ 2.2.2), la concentration de référence provenant de la saieuse s'élève à 5 [g/m<sup>2</sup>] [Emonet04].

Les résultats d'une étude sur trois tronçons de routes différents équipés d'installations automatiques de salage montrent des valeurs de 0.5, de 0.2 et de 0.04 [g/m<sup>2</sup>] pour respectivement le pont de Flamatt dans le canton de Fribourg, le pont des Aigues-Vertes à Genève et le contournement de Lausanne dans le canton de Vaud. Les caractéristiques de ces stations automatiques de déverglage ne sont pas développées dans ce travail [Dumont05].

### A.3 Microclimat

Le microclimat considère l'environnement climatique localisé à l'échelle de l'élément de l'ouvrage. On y distingue les zones ombrées, les zones ensoleillées, les zones exposées aux eaux des précipitations, les zones protégées, les zones de séchage rapides et les zones de stagnation d'eau. Les paramètres composant le microclimat sont la température de l'air, l'humidité relative de l'air, les précipitations et les stagnations d'eau. Ces sollicitations extérieures, accompagnées de produits chimiques provenant de l'épandage hivernal de produits de déverglage, influencent les structures par l'intermédiaire d'échange thermique, de transport d'eau, de gaz et d'autres substances entre l'atmosphère et le béton (§ 3).

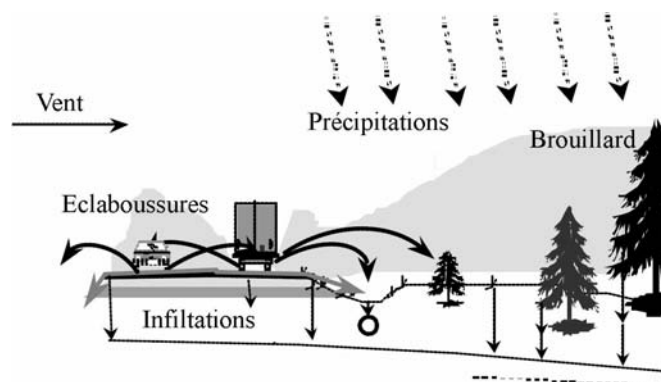


FIGURE A.8: Différents mécanismes de transport par éclaboussures et brouillard, à partir des chaussées routières [Blomqvist01].

La vapeur d'eau contenue dans l'air est toujours en contact avec l'ouvrage, tandis qu'une gouttelette d'eau liquide peut être présente sur une partie d'ouvrage à travers différentes situations (Figure A.8).

- En contact **direct** avec l'ouvrage, l'eau de précipitations atterrit simplement sur la partie d'ouvrage.
- En contact par **projection** de la gouttelette sur la partie d'ouvrage par le passage de véhicules.
- En contact par **condensation** de l'humidité contenue dans l'air sur les ouvrages.

Dans ces configurations énumérées précédemment, la vapeur d'eau et les gouttelettes peuvent contenir d'autres substances dissoutes, telles les ions chlorures. Dans les prochains sous-chapitre (§ A.3.3 à § A.3.4), les différentes zones d'exposition des ouvrages sont introduites, permettant de délimiter plus précisément les zones de segmentation des ouvrages (§ A.3.5).

### A.3.1 Exposition au brouillard

Des zones d'ouvrage peuvent être totalement protégées des eaux de précipitations et sont simplement exposées à l'humidité de l'air. Cette humidité croît quelque peu, avec le passage des véhicules sur les chaussées. L'énergie cinétique des véhicules met en suspension de fines gouttelettes d'eau, ces dernières sont transportées par le mouvement des masses d'air sur l'ouvrage.

Les observations de la réduction de la visibilité sur des routes de Suède, faites à l'aide de caméras, ont été effectuées sur la base des passages des poids lourds, étant donné que pour les véhicules individuels la réduction de la visibilité est faible. La diminution de la visibilité dépend essentiellement des caractéristiques des roues, de la présence ou non de bavettes, de la vitesse des véhicules et également de l'épaisseur du film d'eau sur la chaussée. Cette réduction se produit non seulement à l'arrière du véhicule, mais également transversalement sur une cinquantaine de mètres [Sandberg78] [Sandberg79] [Sandberg80]. Cette réduction de visibilité est directement corrélée aux quantités d'éclaboussures projetées par les véhicules.

D'autres observations furent effectuées sur des tronçons de route, à trafic réel, au Canada. Les vitesses étudiées furent 50, 60, 80 et 100 [km/h]. Des échantillons de neige ont été prélevés à plusieurs endroits sur une ligne transversale par rapport au sens de circulation et ont été analysés. Les résultats indiquent une diminution de la concentration des ions chlorures avec l'éloignement de la chaussée [MacBean87]. D'autres études montrent également que le 90% des chlorures de sodium, contenu dans le brouillard, se déposent sur une distance de 20 mètres, lorsqu'aucun vent n'est relevé [Blomqvist01].

Le vent est également un paramètre important pour le transport de ces gouttelettes sous forme de brouillard sur de grandes distances. Cette distance peut s'élever à plusieurs kilomètres [Blomqvist01].

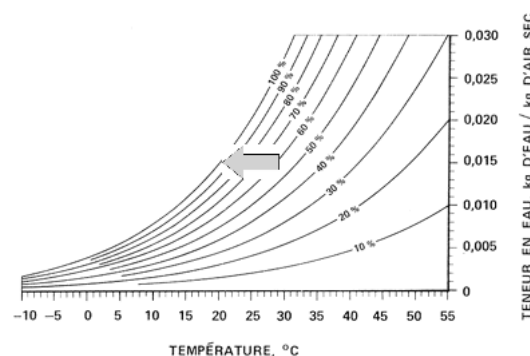


FIGURE A.9: Diagramme psychrométrique montrant l'état de saturation de l'air en fonction de la température et de la teneur en eau dans l'air [IRC04].

Le contact avec la vapeur d'eau sur l'ouvrage peut conduire à de la condensation. Cette condensation se produit lorsque la surface du béton, gardant une inertie thermique froide, reste en contact avec l'air environnant plus chaud. La couche limite, fine couche d'air sur la surface du béton, se trouve à une température équivalente à celle de la surface du béton et varie très rapidement pour atteindre la température de l'air. Si la différence de température est suffisante, l'air se trouve en sursaturation et il apparaît sur la surface du béton de fines gouttelettes d'eau liquide. Cette condensation peut se produire en période hivernale lorsque la teneur en eau dans l'air est importante due au passage des véhicules sur une

chaussée humide et lorsque l'ouvrage est suffisamment froid, comme visualisé sur le diagramme psychrométrique (Figure A.9). Une condensation peut apparaître sur les ouvrages également en période estivale, lorsque l'ouvrage garde une bonne inertie thermique, comme pour les tranchées couvertes ou les murs de soutènement non exposés à un ensoleillement direct. L'air chaud emmagasine plus d'humidité et lorsqu'il se trouve en contact avec l'ouvrage, l'eau contenue dans l'air se précipite.

### A.3.2 Exposition aux éclaboussures

L'eau de précipitations présente sur la chaussée forme un film d'eau atteignant environ 1 à 2 millimètres selon le dispositif d'évacuation des eaux de chaussées. Ce film d'eau s'évacue essentiellement par gravité en fonction du dévers et de la pente longitudinale de la chaussée. Une partie de ce film d'eau est brassée par le passage des véhicules et des gouttelettes sont projetées latéralement. Cette projection dépend essentiellement de la vitesse des véhicules ainsi que de l'épaisseur du film d'eau présente sur la chaussée. Les différentes zones d'exposition de l'ouvrage dépendent également de la position géographique par rapport à la chaussée, soit sa distance transversale horizontale et verticale par rapport aux pneus des véhicules.

Des échantillons de saumure, recueillis en bordure d'autoroute en Suède [Tang00b] par un système de chéneaux disposées à différentes hauteurs, montrent que ces éclaboussures peuvent atteindre une hauteur de 2.5 mètres pour deux positions transversales différentes des chéneaux depuis le bord de la chaussée, soit 3.6 [m] et 5.8 [m]. Les résultats de ces investigations montrent également que la teneur en ions chlorures diminue en fonction de la hauteur. A 2.5 [m] du sol, la concentration en ions chlorures vaut de 5 à 10% de la quantité mesurée au sol. Par analogie à la concentration en ions chlorures, le taux d'éclaboussures diminuent également en fonction de la hauteur [Lindvall00a]. Dès lors, il est possible de parler de diminution de la quantité de saumure éclaboussée en considérant les unités des résultats de mesure. La quantité d'ions chlorures mesurés sont des grammes. En faisant l'hypothèse que la concentration en ions chlorures dans la saumure éclaboussée est la même sur toute la hauteur puisqu'elle provient de la chaussée. La quantité d'ions chlorures ainsi mesurée s'apparente directement aux quantités de saumure éclaboussées, la quantité des ions chlorures (Figure A.10) découle du rapport de la quantité de sel mesuré en gramme par la section verticale d'ouverture des chéneaux en mètre carré.

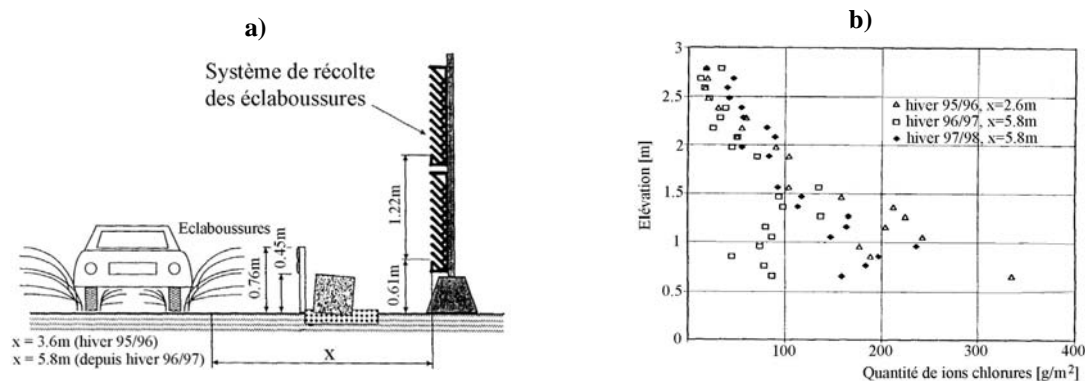


FIGURE A.10: Système de récolte des éclaboussures et résultats des investigations [Tang00b], a) schéma de la station de mesure, b) relation entre la concentration en ions chlorures et la hauteur de mesure.

Lorsqu'une précipitation débute le temps d'humectage de la surface du béton soumise aux éclaboussures devient plus important que pour le cas précédent (§ A.3.3). La surface du béton s'humidifie progressivement et l'état de saturation dépend de l'intensité et de la durée de la pluie, de la quantité de trafic et de la position de l'ouvrage par rapport au bord de la chaussée. Pour le séchage, les mêmes remarques peuvent être apportées que pour l'exposition aux eaux stagnantes (§ A.3.3).

### A.3.3 Exposition à l'eau stagnante

L'eau de précipitations se trouve directement en contact avec l'ouvrage, lorsqu'elle est précipitée. Le temps d'humectation est la période où il se forme sur la surface du béton des gouttelettes d'eau

liquide. Le temps d'humectation est très court et dépend de l'intensité de la précipitation. Le temps d'humectation est souvent de quelques minutes. La surface de l'ouvrage est totalement humectée ou saturée durant la durée de la précipitation. A la fin de l'averse, le séchage de la surface de l'ouvrage s'effectue par évacuation par gravité grâce au système d'évacuation d'eau et au drainage, par évaporation et par succion capillaire de l'eau dans le béton. La durée de cette phase dépend de la quantité du rayonnement solaire, de la température de l'air, de la vitesse du vent et des possibilités de stagnation de l'eau sur la surface, elle peut durer d'une demi-heure à plusieurs heures.

#### A.3.4 Exposition aux ions chlorures

Les produits de déverglaçage se dissolvent dans l'eau et les ions chlorures sont entraînés par l'eau. L'exposition des ouvrages à ces produits dépend essentiellement du mode de transport de l'eau sur ou dans les structures. L'exposition de l'ouvrage aux ions chlorures peut être directement additionnée aux trois niveaux d'exposition de l'eau mentionnés précédemment à savoir exposition à l'eau stagnante (§ A.3.3), exposition aux éclaboussures (§ A.3.2) et exposition au brouillard (§ A.3.1).

Cette exposition dépend également des quantités de produits de déverglaçage épandus sur les chaussées. Ces quantités dépendent essentiellement des moyens à disposition (moyens mécaniques, installations automatiques de salage) (§ A.2.2), du type d'intervention (curatif, préventif) (§ A.2.3) et du type de produit de déverglaçage utilisé (chlorure de sodium, saumure et chlorure de calcium) (§ A.2.4 et § A.2.5). L'exposition aux ions chlorures prend aussi en considération la dissolution avec l'eau de précipitations nivales et pluviales. Ainsi, l'exposition aux ions chlorures évolue dans le temps en fonction des quantités temporelles et massiques des précipitations et elle est directement liée aux trois niveaux d'exposition à l'eau sous forme liquide et de vapeur.

#### A.3.5 Approche segmentielle

L'approche segmentielle [Roelfstra00] est une méthode afin d'évaluer l'état des ouvrages, pour permettre le relevé de données nécessaires à la prévision de leur état. L'approche proposée divise les ouvrages en béton en éléments fonctionnels et structuraux, puis en segments (Figure A.11). L'objectif de la division est d'établir des segments d'ouvrage de même état, qui ont les mêmes propriétés, donc qui ont la même évolution de leur état [Roelfstra00].

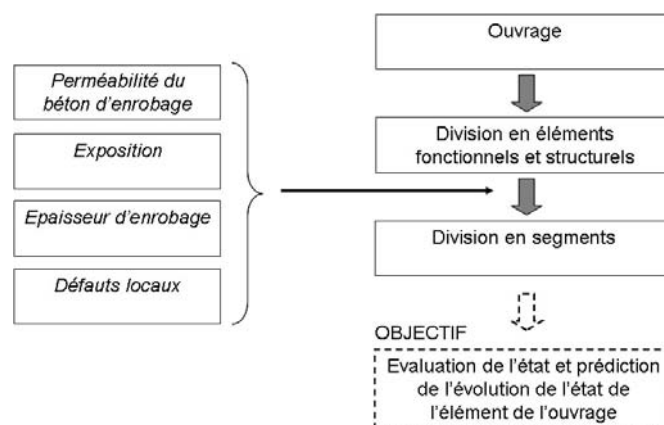


FIGURE A.11: Méthode de division en éléments et en segments [Roelfstra00]

Les éléments structuraux sont divisés en parties d'ouvrages qui ont un rôle identique au niveau de la sécurité structurale, comme les murs, les dalles, les piles, les fondations. Les éléments fonctionnels ont une fonction au niveau de l'aptitude au service et de la sécurité à l'exploitation, comme les revêtements de chaussées, l'étanchéité, les joints. Les éléments en béton sont divisés en segments selon leurs pro-



priétés géométriques, les caractéristiques de leurs matériaux, leur exposition et leurs défauts locaux relevés au cours d'inspections visuelles (Tableau A.5) [Roelfstra00].

Critères	Description
<b>Propriétés géométriques</b>	- Dimensions des éléments en béton - Aire et section de l'armature - Epaisseur de l'enrobage
<b>Propriétés des matériaux</b>	- Propriétés mécaniques telles que la résistance à la traction et à la compression - Propriétés physiques telle que perméabilité du béton d'enrobage
<b>Exposition</b>	- Exposition aux conditions météorologiques et aux agents agressifs tels que produits de déverglaçage
<b>Etat</b>	- Défauts locaux (nids de gravier, épaisseur d'enrobage faible, fissurations, déformations)

TABLEAU A.5: Critères de division en segment [Roelfstra00].

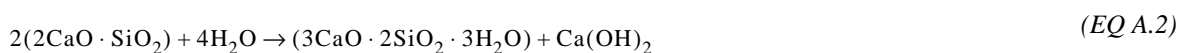
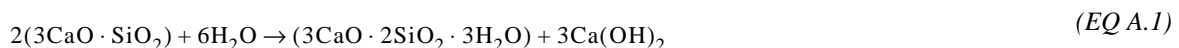
## A.4 Microstructure des bétons

La microstructure des bétons joue un rôle primordial dans la compréhension des différents modes de transport à l'intérieur des bétons. Il convient de différencier le comportement du béton au jeune âge, où toutes les propriétés futures se mettent en place, du comportement du béton à long terme. Lors de la mise en oeuvre du béton, la période de durcissement du ciment s'accompagne d'une consommation d'eau et d'une production de chaleur, appelé hydratation du ciment. La porosité dans le béton se forme également lors de cette étape de durcissement. Il apparaît alors une variabilité des propriétés du béton, si l'on se situe au coeur du béton ou proche de la surface.

La microstructure des bétons est discutée également dans les chapitres suivants (§ A.5 et § A.6) en prenant en compte des mouvements de corps étrangers dans les interstices du béton, de la diffusion thermique dans le béton et du développement des détériorations.

### A.4.1 Hydratation du ciment

La chimie de l'hydratation du ciment portland peut être synthétisée à travers plusieurs publications [Brunauer64] [Bensted83] [Frigione83] [Taylor86]. Deux réactions importantes conduisent à la formation de silicates hydratés CSH (EQ. A.1 et EQ. A.2) [Papadakis89].



$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	formule chimique du silicate de tricalcium, appelée également $\text{C}_3\text{S}$ ,
$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	formule chimique du silicate de dicalcium, appelée également $\text{C}_2\text{S}$ ,
$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	formule chimique du silicate de calcium hydraté, appelée également CSH,
$\text{H}_2\text{O}$	formule chimique de l'eau,
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	formule chimique de la portlandite, produit de réaction après l'hydratation du ciment.

Le taux de réaction de ces deux réactions chimiques sont nommés respectivement  $r_{\text{H,C}_3\text{S}}$  pour le silicate de tricalcium (EQ. A.1) et  $r_{\text{H,C}_2\text{S}}$  pour le silicate de dicalcium (EQ. A.2). Le taux de formation de silicates hydratés correspond à la moyenne des réactions. En parallèle à ces réactions se déroulent également une consommation de l'aluminoferrite de calcium et de l'aluminate de tricalcium se trouvant

dans le gypse. Cette consommation du gypse conduit à la formation de l'ettringite dans le béton. Ainsi la réaction d'hydratation de la pâte de ciment forme la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Figure A.12 a) [Papadakis89].

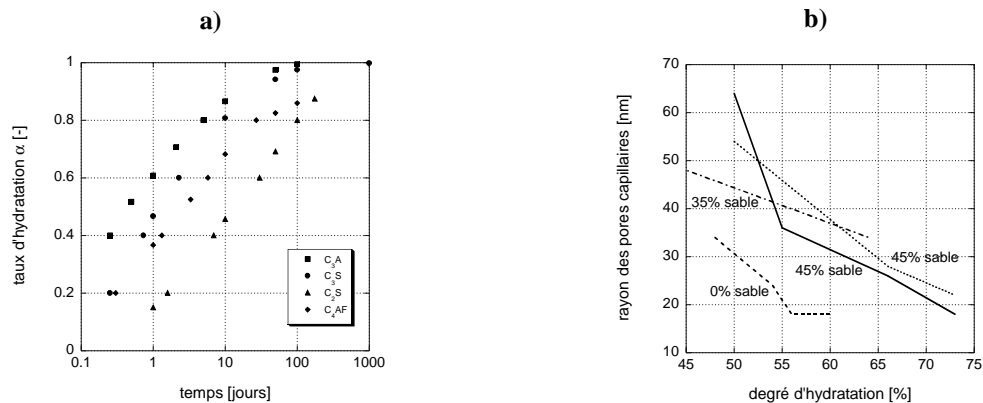


FIGURE A.12: a) vitesse d'hydratation des différents constituants d'un ciment,  $C_4AF$  = aluminoferrite de calcium [Papadakis89], b) changement de la taille critique des pores avec le degré d'hydratation pour des pâtes de ciment et des mortiers avec un rapport de l'eau sur le ciment de 0.4 [Halamicova95].

Le degré d'hydratation peut se formuler par les équations empiriques (EQ. A.3 et EQ. A.4) [Roelfstra89].

$$\Omega = \frac{19}{50} - \left( \frac{26}{15} \cdot E/C \right) + \frac{22}{5} \cdot (E/C)^2 - \left( \frac{22}{5} \cdot (E/C)^3 \right) \quad (EQ. A.3)$$

$$\alpha = \frac{E/C - \Omega}{0.17 + 0.23 \cdot \Omega} \quad (EQ. A.4)$$

$E/C$  [-] rapport de la quantité massique de l'eau sur le ciment,

$\Omega$  [-] paramètre permettant de quantifier le taux d'hydratation,

$\alpha$  [-] degré d'hydratation du béton.

#### A.4.2 Porosité des bétons

La perméabilité du béton est très importante pour l'évaluation de la progression de l'eau, du gaz carbonique et des ions chlorures. Elle est fonction des constituants du béton, de la mise en oeuvre et de l'utilisation de l'ouvrage. La perméabilité du béton dépend de la porosité du béton et du degré de fissuration (Figure A.13).

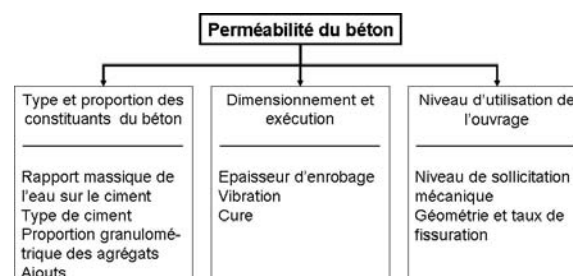


FIGURE A.13: Facteurs influençant la perméabilité du béton [Taheri98].

La porosité dans les bétons peut être représentée par un espace vide ou un réservoir où des substances comme l'eau, les ions et du gaz peuvent être stockés. L'accessibilité à ces pores dépend de la connexion entre eux. Ainsi, un béton peut avoir une très grande porosité avec très peu de connexions entre les pores, comme dans les bétons confectionnés avec un entraîneur d'air. Ces bétons présentent des caractéristiques de perméabilité faible aux sollicitations extérieures en comparaison aux bétons avec un grand réseau de connectivité. La principale source d'échange s'effectue dans les pores capillaires, dont le degré de connectivité dépend de la maturité et de la composition du béton. L'air occlus est une porosité grossière introduite lors de la mise en place du béton et ne contribue pas aux échanges entre l'atmosphère et le béton. Les pores formés par l'air entraîné interrompent la communication des pores capillaires (Figure A.14).

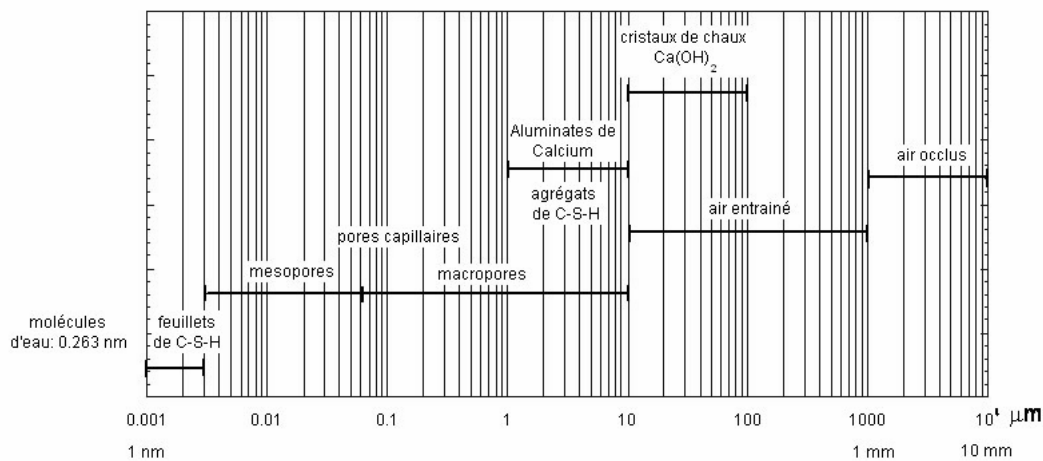


FIGURE A.14: Distribution de la taille des constituants de la pâte de ciment durcie [Bruehwiler04].

La porosité des bétons varie dans le temps en fonction du degré d'hydratation de la pâte de ciment et de la composition de la recette des bétons (Figure A.12 b). Lors de la confection d'un béton, le ciment réagit avec l'eau de gâchage pour former la pâte de ciment durcie. Ce processus chimique de transformation peut durer quelques années et dépend de nombreux facteurs comme, principalement, la forme de l'élément bétonné, la cure et l'exposition aux sollicitations météorologiques. Le taux de transformation est nommé degré d'hydratation [Baroghel94] [Roelstra89].



FIGURE A.15: Porosité modélisée sur un cube de mortier, a) cube de mortier, b) porosité modélisée du cube [Ye02].

La réaction chimique exothermique d'hydratation (§ A.4.1) se traduit par un dégagement de chaleur et par une consommation d'eau. Ce dégagement de chaleur et cette consommation d'eau provoquent ainsi des transferts thermiques et hydriques dans le béton au jeune âge. Le bilan, entre le durcissement de la pâte de ciment, des différents transferts thermiques et hydriques et de la présence de bulles d'air, provoque des porosités avec une certaine connexion entre elles (Figure A.15) [Navi99] [Pignat03].

La perméabilité d'un béton dépend, certes de la porosité, constituant un réservoir aux agents extérieurs, mais également de la connectivité entre les pores. La porosité et la connectivité des pores ont été mises en évidence avec des essais de porosité et, respectivement, des essais de perméabilité à l'air (§ 3).

La carbonatation et la présence d'ions chlorures dans le béton modifient également le volume des pores capillaires. La diminution de volume d'un béton carbonaté s'élève à environ 12%, provenant de la transformation du portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en calcite  $\text{CaCO}_3$  par l'action du gaz carbonique  $\text{CO}_2$  [Chaussadent99]. La diminution de volume dans les mortiers, due à la présence d'ions chlorures, s'élève à 26% [Hornain95]. Cette réduction de volume peut être probablement attribuée à la formation de monochloraluminates et à la cristallisation des chlorures de calcium [Midgley84] [Hornain95].

La porosité du béton, définie par le volume des pores sur le volume total du béton, décroît avec le temps due à l'hydratation, à l'activité pouzzolanique et à la carbonatation. Elle peut s'exprimer sous la forme de l'équation suivante (EQ. A.5).

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\text{ini}} - \Delta\varepsilon_{\text{H}}(t) - \Delta\varepsilon_{\text{C}}(t) \quad (\text{EQ A.5})$$

- $\varepsilon$  [-] volume des pores sur le volume total du béton,  
 $\varepsilon_{\text{ini}}$  [-] porosité initiale avant les effets de l'hydratation et de la carbonatation,  
 $\Delta\varepsilon_{\text{H}}$  [-] réduction de la porosité due à l'hydratation du ciment,  
 $\Delta\varepsilon_{\text{C}}$  [-] réduction de la porosité due à la carbonatation du ciment,  
 $t$  temps.

La porosité initiale se compose essentiellement de l'air emprisonnée lors de la confection du béton et/ou de l'air entraîné pour la confection de certaines recettes de béton. Cette porosité initiale dépend du diamètre maximum des agrégats et du rapport de la masse de l'eau sur le ciment. La diminution de la porosité, due à l'hydratation (§ A.4.1) de la pâte de ciment, est due à la transformation chimique du gypse. En utilisant, le rapport des masses molaires entre les produits de réactions et les produits réagis, il est possible de quantifier ces termes. De manière identique, le rapport des masses molaires entre la portlandite et le carbonate de calcium permet de tenir compte de la diminution de la porosité due à la carbonatation. Ainsi une formulation, présentant la porosité de la pâte de ciment, est reliée à la porosité totale (EQ. A.6) [Papadakis91].

$$\varepsilon_p(t) = \varepsilon(t) \cdot \left( 1 + \frac{\frac{G \cdot \rho_C}{C \cdot \rho_G}}{1 + \frac{E \cdot \rho_C}{C \cdot \rho_w}} \right) \quad (\text{EQ A.6})$$

- $C$  [ $\text{kg/m}^3$  de béton] quantité de ciment,  
 $G$  [ $\text{kg/m}^3$  de béton] quantité de granulats,  
 $E$  [ $\text{kg/m}^3$  de béton] quantité d'eau de gâchage,  
 $\rho_C$  [ $\text{kg/m}^3$ ] masse volumique du ciment,  
 $\rho_G$  [ $\text{kg/m}^3$ ] masse volumique des granulats,  
 $\rho_w$  [ $\text{kg/m}^3$ ] masse volumique de l'eau.

Pour un ciment portland complètement hydraté et complètement carbonaté, la porosité peut s'exprimer par la formulation ci-après (EQ. A.7) [Papadakis92a].

$$\varepsilon_p = \frac{\rho_C}{\rho_w} \cdot \frac{E/C - 0.3}{1 + (\rho_C/\rho_w) \cdot (E/C)} \quad (\text{EQ A.7})$$

La connectivité entre les pores capillaires peut être réduite par une imprégnation hydrophobe. Un élément caractéristique essentiel dans les procédures de revêtement est l'épaisseur de la couche. En fonction de celle-ci, on différencie une imprégnation hydrophobe, d'un enduit, d'une fine pellicule ou d'un mortier de protection. L'imprégnation hydrophobe, hydrolysé sous l'effet de l'humidité relative, se condense par la suite pour former une couche de protection chimique stable en profondeur dans les interstices du béton.

La prise en compte du volume du béton peut être évaluée sous la forme de l'équation suivante (EQ. A.8), où les composants du béton sont rapportés à leur masse volumique [Papadakis00].

$$\frac{C}{\rho_C} + \frac{G}{\rho_G} + \frac{E}{\rho_w} + \frac{D}{\rho_D} + \varepsilon = 1 \quad (EQ A.8)$$

D [kg/m<sup>3</sup> de béton] quantité d'ajout, par exemple un fluidifiant,

$\rho_D$  [kg/m<sup>3</sup>] masse volumique de l'ajout, par exemple un fluidifiant.

L'humidité présente dans le béton se trouve dans les interstices du béton. Elle est souvent représentée par la teneur en eau dans le béton qui est le poids d'eau rapporté au volume de béton (EQ. A.9).

$$w = \frac{W_e}{W_b \cdot \rho_b} \quad (EQ A.9)$$

w [kg/m<sup>3</sup> béton] teneur en eau du béton,

$W_e$  [kg] masse d'eau libre dans les pores,

$W_b$  [kg] masse du béton,

$\rho_D$  [kg/m<sup>3</sup>] masse volumique du béton.

A l'état saturé, tous les vides dans les pores du béton sont remplis d'eau. Cet état se nomme teneur en eau saturée du béton, sa formulation peut être approchée par une équation prenant en considération les ingrédients du béton (EQ. A.10) [Femmasse04].

$$w_{sat} = C \cdot \frac{E}{C} - (0.17 \cdot \alpha \cdot C) + 10 \cdot \varepsilon \quad (EQ A.10)$$

$w_{sat}$  [kg/m<sup>3</sup>] teneur en eau, à l'état saturé, rapportée au volume de béton.

#### A.4.3 Effets de paroi

Lors de la mise en oeuvre d'un béton, les gros granulats sont plus éloignés des coffrages et des armatures. Les vides entre les gros granulats sont beaucoup plus importants qu'à l'intérieur du matériau. De ce fait, les zones les plus proches des parois sont plus riches en éléments fins que le coeur du matériau. Cette zone, appelée peau du béton, présente des propriétés de béton différentes sur une épaisseur équivalant à environ la moitié du diamètre maximale des granulats composant le béton (Figure A.16 a) [Sadouki87]. L'emplacement de l'élément analysé joue un rôle important pour les caractéristiques de cette peau du béton, comme par exemple les faces supérieures de dalles non coffrées. Dans ce cas d'exemple, le lait de ciment remonte en surface lors de la vibration du béton formant une peau de béton plus importante. La ségrégation, lors d'une mise en place incorrecte d'un béton, peut également jouer un rôle sur la perméabilité. Mais dans ce cas, il s'agit d'un problème à plus grande échelle. Le coffrage influence également l'épaisseur de la peau du béton. Ainsi un coffrage en bois bien huilé permet d'obtenir une épaisseur de peau assez faible par rapport à un coffrage métallique. Les propriétés du béton d'enrobage sont encore améliorées avec l'utilisation de nappes de coffrages à perméabilité contrôlée [Zemdrain02] [DuPont04]. L'eau de gâchage en surplus est absorbée par le matériau

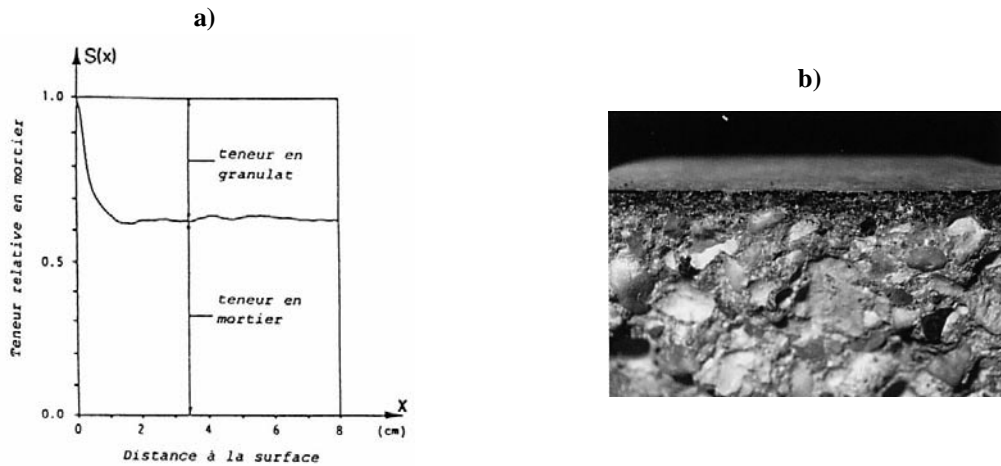


FIGURE A.16: Influence des nappes de coffrage sur la peau du béton, a) teneur relative en mortier en fonction de la profondeur dans le béton d'enrobage [Sadouki87], b) photo du béton d'enrobage et mise en évidence de la peau du béton [Zemdrain02].

puis l'eau est restituée sans excès lors de l'hydratation du ciment (Figure A.16 b) [Denarie05] [Marosszeky93] [Juergen93].

Les principaux changements des propriétés dans la peau du béton sont la porosité, la capacité d'adsorption, la masse volumique et la teneur en granulat, comparées aux caractéristiques du coeur du béton. La masse volumique croît dans la peau du béton, la teneur en granulat diminue, ce qui augmente considérablement la porosité et la capacité d'adsorption. Par contre, le module d'élasticité diminue dans cette zone (Figure A.17) [Kreijger84].

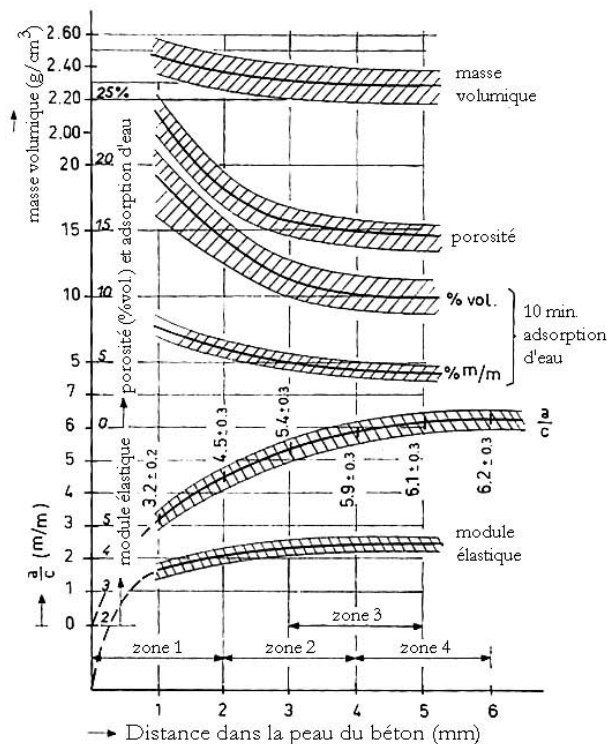


FIGURE A.17: Composition et propriétés de la peau du béton [Kreijger84].

Il convient de différencier la peau du béton du béton d'enrobage. Le béton d'enrobage, ou la profondeur de respiration, est une profondeur dans le béton où la teneur en eau et la concentration en ions chlorures varient très rapidement avec le temps (Figure A.18).

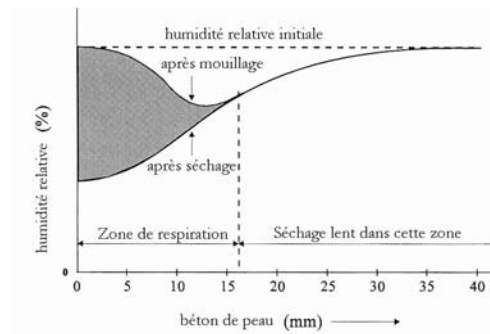


FIGURE A.18: Mise en évidence de la profondeur de respiration [Taheri98].

## A.5 Transferts thermique, gazeux, hydrique et ionique dans le béton

La période d'initiation de la corrosion est un temps durant lequel des corps étrangers transitent dans le béton d'enrobage. Cette période d'incubation est marquée par des transformations chimiques, des interactions entre les différents corps et des mouvements. A la fin de cette période d'incubation et lorsque la quantité de corps étrangers se trouve en quantité suffisante, les détériorations débutent. Ainsi, ce paragraphe relate les différentes connaissances sur le transfert thermique, gazeux, hydrique et ionique dans le béton d'enrobage. Il apporte un éclaircissement des méthodes utilisées actuellement pour prédire l'évolution de ces différents transferts.

### A.5.1 Transfert thermique

En-dessous de  $0^{\circ}\text{C}$  et selon la taille des pores, l'eau contenue dans les interstices du béton gèle. La température de solidification de l'eau dépend de la dimension des pores, de la température et de la quantité et du type d'ions présent dans l'eau (§ A.5.5). Ainsi plus les pores du béton sont de petites tailles, plus la température de congélation doit être basse pour un changement de phase [Baroghel94]. La conductivité thermique de la glace est plus importante que la conductivité thermique de l'eau (Figure A.19) [Olsen84]. Ainsi, avec ce changement de phase de l'eau, la conductivité thermique du béton augmente à des températures inférieures à  $0^{\circ}\text{C}$ .

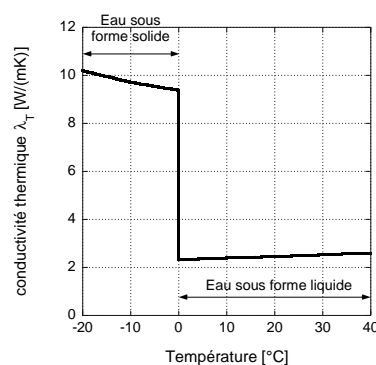
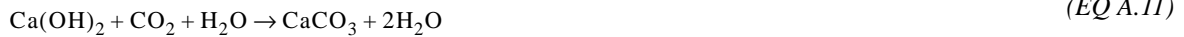


FIGURE A.19: Conductivité thermique de l'eau et la glace contenue dans le béton, selon [Olsen83].

### A.5.2 Transfert gazeux

Le gaz carbonique  $\text{CO}_2$ , contenu dans l'atmosphère (§ A.1.5) s'introduit dans le béton par l'intermédiaire de l'eau sous forme de gaz carbonique dissous et par l'intermédiaire de la diffusion du gaz dans le milieu poreux du béton [Ishida00] [Ishida02] [Ishida02a] [Maekawa02]. La portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

contenue dans la pâte de ciment réagit avec le gaz carbonique et l'eau pour former le carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  (EQ. A.11) [Denarié88]. La carbonatation produit également de l'eau [Houst83].



$\text{Ca(OH)}_2$  formule chimique de la portlandite, produit de réaction après l'hydratation du ciment,

$\text{CO}_2$  formule chimique du gaz carbonique,

$\text{CaCO}_3$  formule chimique du carbonate de calcium.

D'autres réactions accompagnent la réaction de la portlandite, il s'agit de la carbonatation des silicates et des aluminates. La carbonatation de la portlandite reste, pour les bétons confectionnés avec du ciment portland, la transformation chimique la plus rapide par rapport à ces deux dernières [Vénuat69] [Vénuat97].

L'évolution de la carbonatation dépend de la consistance du béton (rapport massique de l'eau sur le ciment, dosage en ciment, type du ciment), de la cure du béton après sa mise en place, de l'atmosphère environnante (température, teneur en eau du béton, concentration dans l'air de gaz carbonique), de la teneur en portlandite. Une augmentation de la quantité de ciment dans la recette du béton, une diminution de la porosité (par exemple en faisant attention à la cure du béton), un taux de concentration faible du gaz carbonique dans l'air, une faible teneur en portlandite dans le ciment diminuent la vitesse de carbonatation [Houst92a].

#### A.5.2.1 Influence de la teneur en eau et de la température du béton

Avec un faible taux d'humidité dans le béton, le gaz carbonique diffuse rapidement, mais les pores sont secs et la réaction de carbonatation est très lente. Par contre avec un taux d'humidité élevé, tous les pores sont pratiquement saturés, voire saturés, et la diffusion du gaz carbonique devient très lente. Ainsi la vitesse de carbonatation devient importante avec un taux d'humidité relative s'élevant de 50 à 70% (Figure A.20) [Schiessl76].

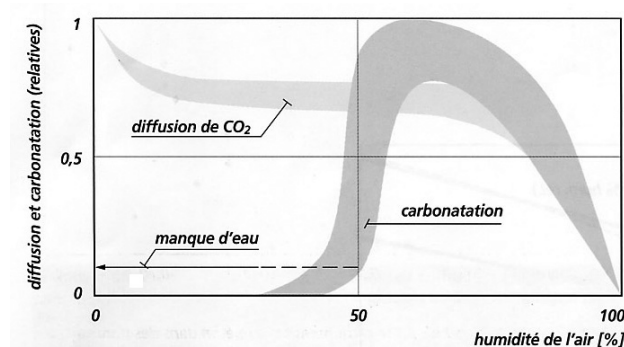


FIGURE A.20: Vitesse de diffusion du gaz carbonique et vitesse de carbonatation en fonction de l'humidité relative [Hunkeler99a].

L'accroissement de la température augmente le séchage, ce qui diminue également la vitesse de carbonatation du béton [Houst92a].

#### A.5.2.2 Modification de l'alcalinité du béton

La portlandite constitue le «réservoir» d'alcalinité du béton, son pH s'avoisine à 12.6 [Chaussadent99]. Lorsque la portlandite est consommée par ces réactions chimiques, le pH chute à un niveau de 6 à 6.5 et à ce niveau, le béton est totalement carbonaté [Pettersson96]. Le processus de carbonatation passe par quatre phases différentes [Drochytka01].



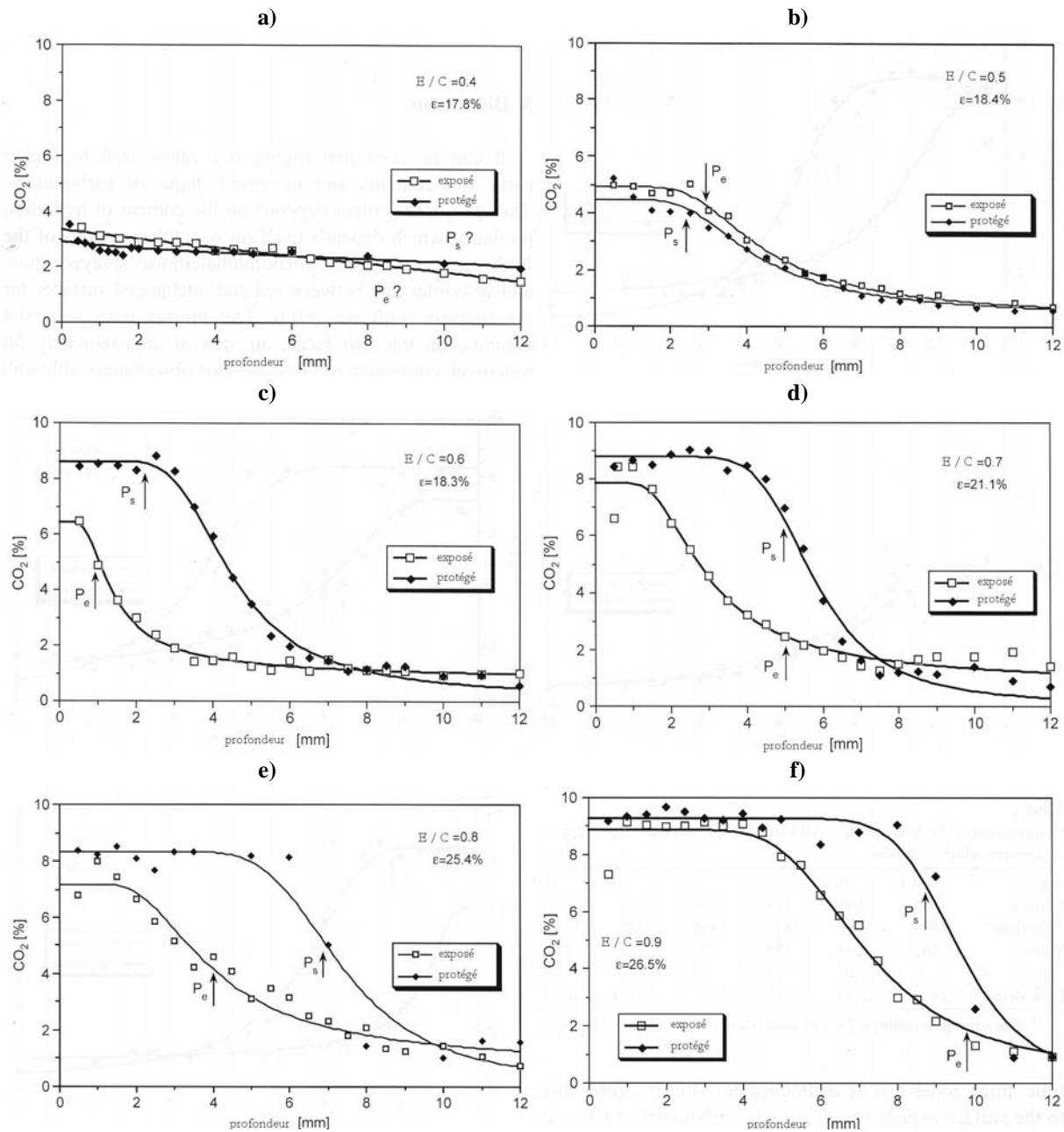


FIGURE A.21: Profils de concentration de gaz carbonique en fonction de la profondeur dans un mortier après 40.5 mois avec des rapports massiques de l'eau sur le ciment différents [Houst02].

1) Dans la première phase de carbonatation, la portlandite se transforme en carbonate de calcium insoluble, provoquant une diminution du volume des pores. Durant cette phase, les propriétés mécaniques du béton sont améliorées et le pH s'avoisine de 10.8 à 12.6.

2) Dans la seconde phase de carbonatation, d'autres produits d'hydratation sont attaqués par le gaz carbonique. Le produit de ces réactions est le carbonate de calcium additionné d'un gel d'acide silicique. Durant cette phase, les propriétés mécaniques retrouvent leur valeur initiale et le pH s'avoisine de 9.6 à 10.8.

3) La troisième phase de carbonatation est caractérisée par la cristallisation rapide des carbonates dans la solution intergranulaire. Les propriétés mécaniques se détériorent et une diminution importante du pH est notée aux alentours de 8.0 à 9.6.

4) La quatrième phase est caractérisée par une consommation quasi totale de la portlandite. Les cristaux d'aragonite et de calcite se répandent dans toute la pâte de ciment durcie. La valeur du pH est très

basse et le risque de corrosion uniforme des aciers d'armature se situant dans cette zone devient important en présence d'humidité.

Le profil du pH dans le béton d'enrobage varie selon la perméabilité du béton et également selon son exposition à l'environnement extérieure et à l'humidité. Des essais sur mortier [Houst02] montrent une grande variabilité de profil par rapport à l'exposition pour des rapports massiques de l'eau sur le ciment élevé. Par ailleurs, il est montré que les tests à la phénolphthaleïne (dans la zone de virage du pH de la phénolphthaleïne est compris entre 8.2 et 10.0, la phénolphthaleïne devient colorée pour des valeurs du pH en-dessous de ce virage) ne dépendent pas de la concentration de gaz carbonique, notée P sur les profils de pH (Figure A.21) [Houst02].

### A.5.3 L'eau dans les bétons

L'eau est le moteur de transport ionique dans le béton d'enrobage. Le pouvoir de dissolution de l'eau, ses propriétés physiques à chacun de ces états influencent fortement le transport ionique dans le béton. Aussi faut-il considérer l'eau et son mouvement dans les trois états naturels, gazeux sous forme de vapeur d'eau, liquide sous forme d'eau et solide sous forme de glace. Les différents mouvements se nomment respectivement diffusion de vapeur d'eau et transport par capillarité de l'eau liquide, tandis que la glace est considérée comme inerte. La frontière entre les trois états de la matière, bien connue pour l'eau liquide, devient plus difficile lorsque l'eau est véhiculée dans les pores du béton et lorsqu'elle transporte d'autres ions avec elle.

Le passage d'un état à l'autre de la matière s'appelle changement de phase. Le changement de phase pour un matériau s'appelle,

- la fusion pour un passage de l'état solide à l'état liquide,
- la solidification ou la congélation pour un passage de l'état liquide à l'état solide,
- la vaporisation pour un passage de l'état liquide à l'état gazeux,
- la liquéfaction pour un passage de l'état gazeux à l'état liquide,
- la sublimation pour un passage de l'état solide à l'état gazeux,
- la cristallisation pour un passage de l'état gazeux à l'état solide.

#### A.5.3.1 Propriétés physiques de l'eau

L'eau, formée de deux atomes d'oxygènes et d'un atome d'hydrogène, présente des propriétés physiques uniques (Figure A.22). La façon dont les liaisons hydrogène maintiennent les molécules d'eau à l'intérieur d'une structure rigide, mais ouverte, explique par exemple la formation de la cristallisation d'un flocon de neige [Hill02].

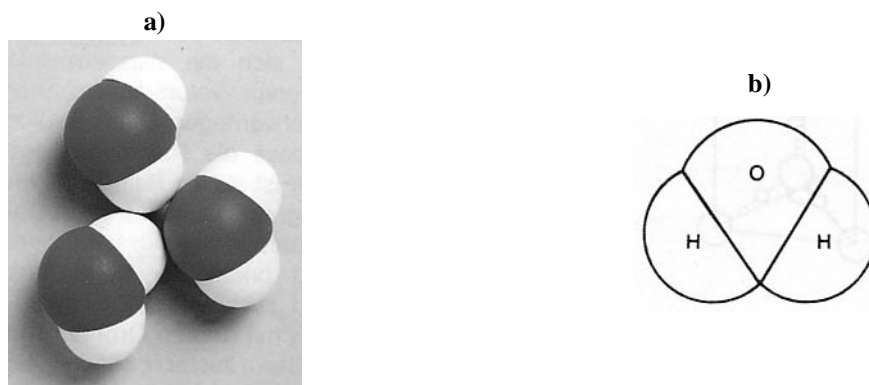


FIGURE A.22: L'eau sous forme d'atomes et molécules, a) les liaisons moléculaires de l'eau, mise en évidence des forces intermoléculaires, disposition particulière de 3 molécules d'eau [Amreim86], b) représentation de la molécule d'eau [Rösli83].

Lors de la fusion de la glace, une partie des liaisons des atomes d'hydrogène se rompt. Il s'ensuit que les molécules d'eau se rapprochent et le volume diminue d'environ 10%, ce qui entraîne une augmentation de la masse volumique. Si on chauffe de l'eau liquide à une température légèrement supérieure au point de fusion, un plus grand nombre de liaisons d'hydrogène se rompent. Les molécules se tassent encore davantage et la masse volumique de l'eau liquide augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne un maximum à 3.98°C (Figure A.23 a) [Hill02]. Au delà de ce point, la masse volumique diminue avec l'augmentation de la température. La dilatation devient plus importante que la contraction liée au logement de petits fragments du réseau de la glace à l'intérieur des plus gros [Javet95].

Les forces de liaisons lors de la formation de la vapeur d'eau sont quasi inexistantes. Cet état permet au gaz de vapeur d'eau d'occuper tout le volume qui est à disposition (Figure A.23 b) [Amreim86].

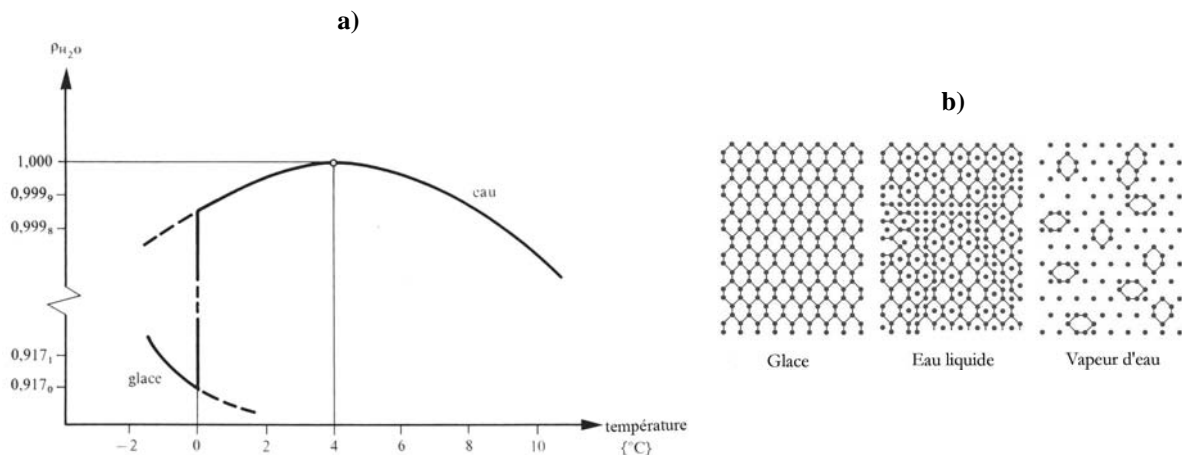


FIGURE A.23: a) Masse volumique de l'eau et de la glace en fonction de la température [Javet95], b) Liaisons moléculaires de l'eau dans ses trois phases, sous forme solide, liquide et gazeux [Amreim86].

### A.5.3.2 Diagramme de phase de l'eau

Le changement de phase de l'eau est également lié à la pression ambiante. Ainsi les liaisons hydrogène se rompent plus facilement à pression élevée. La courbe de fusion de la glace montre une droite avec une pente à signe négatif ce qui signifie que plus la pression est élevée, plus la température de fusion est basse (Figure A.24).

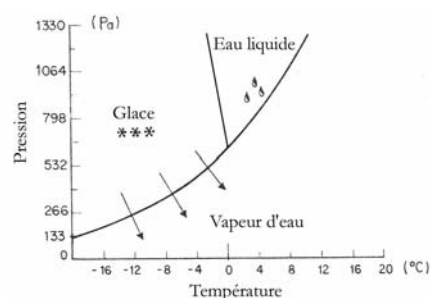


FIGURE A.24: Diagramme de phases de l'eau; glace, eau liquide et vapeur d'eau [Rösli83].

### A.5.3.3 Pression de vapeur d'eau

Une augmentation de l'énergie thermique et de la pression permettent de vaporiser l'eau. On appelle pression de vapeur d'eau, la pression partielle exercée par un liquide lorsqu'elle est en équilibre dynamique avec le liquide, dans un état isotherme. Il y a équilibre dynamique avec le liquide à chaque fois que le taux d'évaporation compense le taux de liquéfaction du liquide. Un changement de température ou de pression peut accentuer le passage d'état et provoquer par exemple de la condensation (§ A.3.1).

L'humidité relative de l'air est définie par la quantité d'eau sous forme de vapeur présente dans l'air, rapportée à la quantité d'eau sous forme de vapeur contenue dans l'air à l'état de saturation (EQ. A.12) [Lindvall01].

$$RH_{\text{air}} = \frac{\rho_e}{\rho_{\text{air},s}(T)} = \frac{p_v}{p_{v,s}(T)} \quad (\text{EQ A.12})$$

$RH_{\text{air}}$  [-] humidité relative de l'air,

$\rho_e$  [kg/m<sup>3</sup>] masse volumique de la vapeur d'eau,

$\rho_{\text{air},s}$  [kg/m<sup>3</sup>] masse volumique de la vapeur d'eau saturante,

$p_v$  pression partielle de vapeur d'eau,

$p_{v,s}$  pression partielle de vapeur d'eau saturante,

$T$  [°C] température.

La quantité d'eau maximale à l'état de saturation varie d'une façon exponentielle avec la température, comme dans la loi de Magnus (EQ. A.13) (Figure A.9).

$$\rho_{\text{air},s}(T) = 10^{\frac{7.45 \cdot T}{235 + T}} \quad (\text{EQ A.13})$$

#### A.5.3.4 Viscosité de l'eau

Lors de l'écoulement de l'eau, une partie du liquide se déplace par rapport aux parties adjacentes et les forces de frottement apparaissent à l'intérieur du liquide appelées forces de cohésion. La viscosité de l'eau dépend de la température, elle diminue avec l'augmentation de cette dernière (Figure A.25) [Frick93].

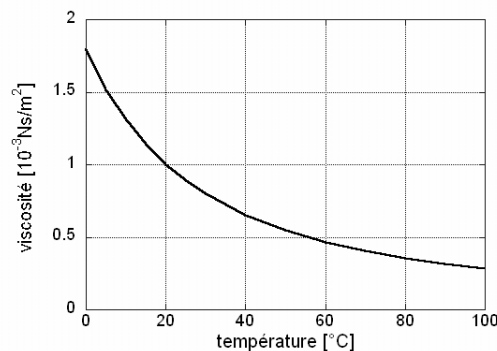


FIGURE A.25: Viscosité de l'eau pure en fonction de la température, d'après [Frick93].

#### A.5.3.5 Tension superficielle

On appelle tension superficielle, la quantité de travail requise pour augmenter la surface d'un liquide. Sa valeur pour l'eau vaut 0.0729 [J/m<sup>2</sup>]. L'énergie nécessaire à rompre les forces internes du liquide est telle que le liquide cherchera à occuper une surface minimale par rapport à son volume. Ainsi une gouttelette d'eau cherche à prendre une forme sphérique pour avoir une surface minimale. La distinction entre les forces d'adhésion et les forces de cohésion permet de considérer les tensions externes et les tensions internes du liquide. Les forces de cohésion sont représentées par les forces internes entre molécules semblables. Les forces d'adhésion sont les forces intermoléculaires entre molécules dissemblables. Lorsque les forces d'adhésion entre un liquide et une surface sont plus élevées que les

forces de cohésion du liquide, on dit que le liquide mouille la surface. Dans ce cas, le liquide a tendance à s'étendre sur son support (Figure A.26) [Rösli83].

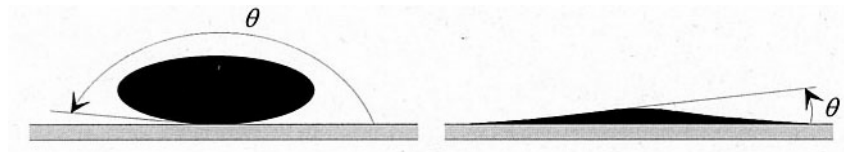


FIGURE A.26: Visualisation de l'angle de contact sur une gouttelette d'eau, la partie de droite montre le cas d'un liquide mouillant une surface [Janz97].

L'angle de contact  $\theta$  (Figure A.26) prend en considération les tensions superficielles des trois contacts, c'est-à-dire le gaz, le liquide, et le matériau solide (EQ. A.14) [Janz97].

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}} \quad (EQ. A.14)$$

- $\theta$       [ $^{\circ}$ ] angle de contact,
- $\gamma$       [ $J/m^2$ ] tension superficielle,
- S      indice indiquant le matériau à l'état solide,
- L      indice indiquant le matériau à l'état liquide,
- G      indice indiquant le matériau à l'état gazeux.

#### A.5.3.6 Ascension capillaire

Le bilan des forces de cohésion et d'adhésion produit des vecteurs forces influençant la surface de l'eau. Ces vecteurs peuvent être visualisés en glissant par exemple, un tube capillaire dans l'eau (Figure A.27 a). Dès son insertion, le niveau d'eau change selon le diamètre du tube capillaire, les forces de cohésion du liquide et les forces d'adhésions entre le liquide, l'air dans le tube capillaire et le matériau du tube capillaire. Si l'on projette ce qu'il se passe dans un tube capillaire sur la structure des pores du béton, des forces apparaissent augmentant les vitesses de transport de l'eau dans le béton.

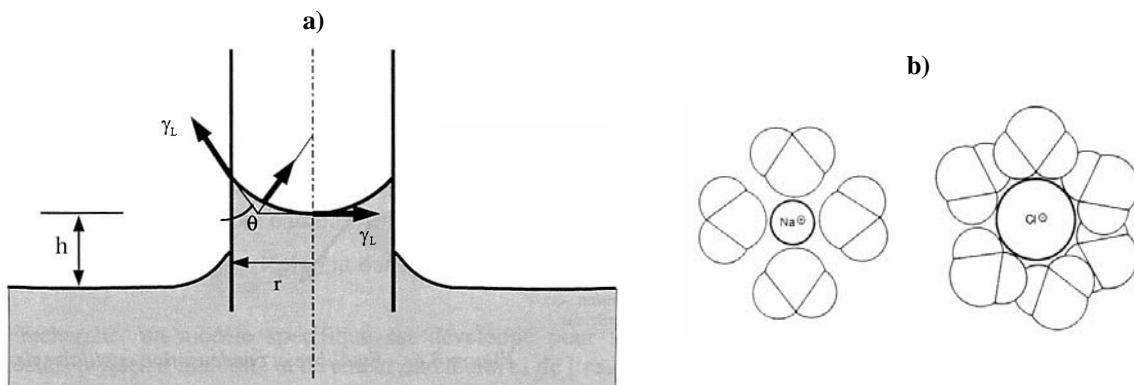


FIGURE A.27: a) Ascension capillaire dans un tube capillaire [Roelfstra00], b) Dissolution du chlorure de sodium dans l'eau sous forme de molécule [Rösli83].

Ce changement de niveau peut être formulé en considérant que la surface d'eau dans le capillaire forme un ménisque sphérique selon la loi de Jurin (EQ. A.15) [Rösli83] [Flueckiger93a].

$$h = \frac{2 \cdot \gamma_L \cdot \cos(\theta)}{r \cdot \rho_w \cdot g} \quad (EQ A.15)$$

$h$  [m] remontée capillaire dans le tube capillaire,

$\gamma_L$  [J/m<sup>2</sup>] tension superficielle de l'eau liquide,

$g$  [m/s<sup>2</sup>] force d'attraction terrestre valant 9.81 [m/s<sup>2</sup>],

$r$  [m] rayon du tube capillaire,

$\rho_w$  [kg/m<sup>3</sup>] masse volumique de l'eau.

Le théorème de Laplace relie entre elles la tension superficielle, la courbure moyenne du ménisque et la différence de pression à la surface de séparation des deux fluides (EQ. A.16) [Courard99].

$$p_{atm} - p_w = \frac{2 \cdot \gamma_L \cdot \cos(\theta)}{r} \quad (EQ A.16)$$

$p_{atm}$  [N/m<sup>2</sup>] pression de l'air environnante,

$p_w$  [N/m<sup>2</sup>] pression de l'eau.

#### A.5.4 La saumure

Le chlorure de sodium se dissout dans l'eau pour former de la saumure. D'un point de vue chimique, les atomes de sodium attirent les atomes d'hydrogène. Par contre, les atomes de chlore attirent les atomes d'oxygène (Figure A.27 b). Cette propriété permet de garder une atmosphère à humidité relative contrôlée grâce à un sel. Ainsi le séchage d'éprouvettes à atmosphère contrôlée, développé dans le cadre de cette thèse (§ 3.2.3.3), a été effectué au moyen de différents sels [Conciatori05].

A pression atmosphérique, la température de congélation diminue en fonction de l'augmentation de la concentration en chlorure de sodium. Cette diminution se trouve limitée par la capacité maximale de dissolution du chlorure de sodium dans l'eau. La concentration limite de dissolution est de 27% de chlorure de sodium dans l'eau. A partir de ce seuil, les grains de chlorure de sodium précipitent et la concentration de chlorure de sodium dissoute dans l'eau n'augmente plus (Figure A.28 a).

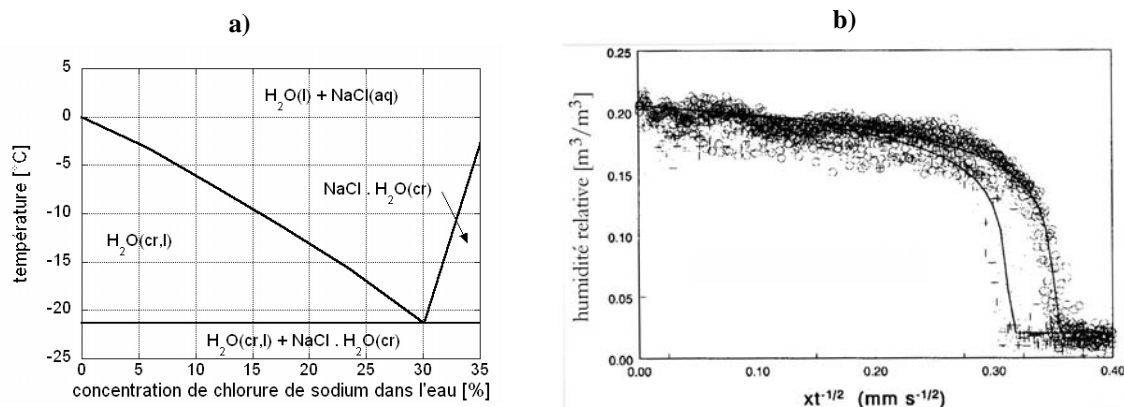


FIGURE A.28: a) Diagramme de phase de la saumure, cr = cristallisation, aq = aqueuse, l=liquide, selon [Akinfiev01], b) Mise en évidence du front de pénétration durant l'essai de capillarité, (o) eau pure, (+) eau avec 4 mole de chlorure de sodium [Pel00].

La présence de chlorures de sodium dans les pores du béton ralentit la vitesse de transport de l'eau entre les interstices du béton. Des essais sur des briques de silicates de calcium mettent en évidence cette diminution de vitesse (Figure A.28 b) [Pel00].

La présence d'espèces ioniques dans l'eau change sa viscosité, sa surface de tension et sa masse volumique, raison pour laquelle les coefficients de diffusion et de capillarité de l'eau s'en trouvent affectés [Kropp95].

#### A.5.5 L'eau dans les pores du béton

Les mécanismes de transport d'un liquide ou d'un gaz dans les milieux poreux se classent en trois catégories principales [Courard99].

- La diffusion, qui concerne le transfert de molécule ou d'ions dans un fluide interstitiel, de régions à fortes concentrations vers des régions à faibles concentrations.
- La perméation, qui concerne le mouvement de liquide ou de gaz soumis à des différences de pression.
- La succion capillaire, relative au transport de liquides dans des solides poreux provenant de la tension superficielle agissant dans les pores capillaires.

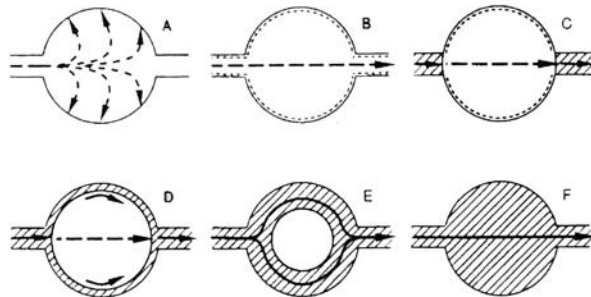


FIGURE A.29: Schéma des différents transports de l'eau dans les pores du béton [Amreim86] [Oberbeck95] [Flueckiger96] [Schiegg02] [Ungricht04], A) Diffusion de vapeur d'eau, B) Diffusion de vapeur d'eau avec une formation d'une ou plusieurs couches de molécules d'eau sur les paroi des pores, C) Diffusion de vapeur d'eau avec condensation dans les passages d'un pore à l'autre, D) Diffusion de vapeur d'eau avec condensation dans le pore, E) Succion capillaire avec bulles d'air, F) Succion capillaire avec état de saturation complet dans les pores du béton.

En analysant l'eau interstitielle dans le béton, plusieurs types d'eau peuvent être également différenciés [Courard99].

- L'eau d'absorption, qui comprend l'humidité retenue mécaniquement dans les vides du béton.
- L'eau d'adsorption, qui représente l'eau fixée superficiellement à la surface des particules. Les surfaces libres de solides présentent des niveaux d'énergie plus élevées que les particules intérieures, dues à un défaut d'attraction avec les molécules adjacentes. Cette énergie de surface provoque l'absorption de l'humidité atmosphérique.
- L'eau d'hydratation, qui représente l'eau retenue par des liaisons physiques à l'échelle moléculaire. Elle fait partie de la structure cristalline du sel.
- L'eau de constitution, qui est en fait l'eau retenue par les liaisons chimiques, elle fait partie de la molécule, comme dans la formation de la portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).

Seules les eaux d'adsorption et d'absorption sont capables de véhiculer des ions et des molécules dans le réseau poreux ouvert du béton (Figure A.29).

##### A.5.5.1 Gel dans les pores du béton

La température de congélation de l'eau contenue dans les pores diminue lorsque la taille des pores diminue également. Lors du changement de phase, le cristal de glace en formation capte de l'eau autour de lui. La variation de la masse volumique durant cette transformation refoule l'eau liquide à travers les interstices du béton. Si les pressions hydrauliques sont dissipées, l'équilibre thermodynamique entre la

glace et la solution liquide induit une dépression de la phase liquide par rapport à la phase solide, contractant le matériau, augmentant les cristaux de glace dans les pores les plus grands et augmentant progressivement la saturation du matériau [Zuber02] [Kaufmann99].

L'effet d'éclatement, provoqué par l'eau en train de geler, est un dégât du béton dû au gel, quand le degré de saturation dépasse 90%. Ce phénomène se produit lorsque le béton, dans la zone de la surface, peut de façon répétée se gorger d'eau et geler. Les sels de déverglaçage amplifient l'effet d'éclatement. Ce phénomène d'éclatement dépend aussi de la température de gel de l'eau et des dimensions des pores [Bruehwiler04].

Les pores capillaires absorbent l'eau de la surface du béton. Cette eau peut geler à des températures extérieures basses. L'accroissement de volume, lors de la transformation de l'eau en glace, vaut 9% du volume d'eau. Cette expansion empêchée, dans le cas par exemple de la formation de glace dans un pore complètement rempli, il apparaît alors une pression hydraulique et un éclatement du béton de surface. Ce processus est favorisé par les microfissures existantes. Les dégâts visibles dus au gel commencent le plus souvent par les relevés de faillançage superficiel [Bruehwiler04].

Lors de l'influence combinée du gel et du sel de déverglaçage, la structure de béton d'enrobage, en contact avec l'environnement extérieur, subit essentiellement trois phénomènes.

- Un choc thermique résulte d'une réaction spontanée endothermique du sel avec la glace. Cette réaction soutire de l'énergie pour la fusion au béton et se traduit par un refroidissement plus rapide de la structure. Une chute de température est particulièrement marquée dans la couche proche de la surface causant des tensions non négligeables dans la structure en béton.
- Les qualités hygroscopiques du sel de déverglaçage provoquent dans le corps du béton poreux, et, renforcé par la succion capillaire, une absorption plus rapide d'eau en présence de sel. La pression de vapeur sur une solution de sel aqueuse est plus petite que sur une eau pure. Ainsi la quantité d'eau est essentiellement plus importante en présence de sel de déverglaçage dans le béton, et la pression de la glace peut agir comme l'eau pure.
- Après des salages répétés et comme le point de congélation de l'eau dépend directement de la teneur en sel, il en résulte la courbe de congélation de l'eau dans le béton esquissée ci-après (partie gelée, hachurée dans la Figure A.30).

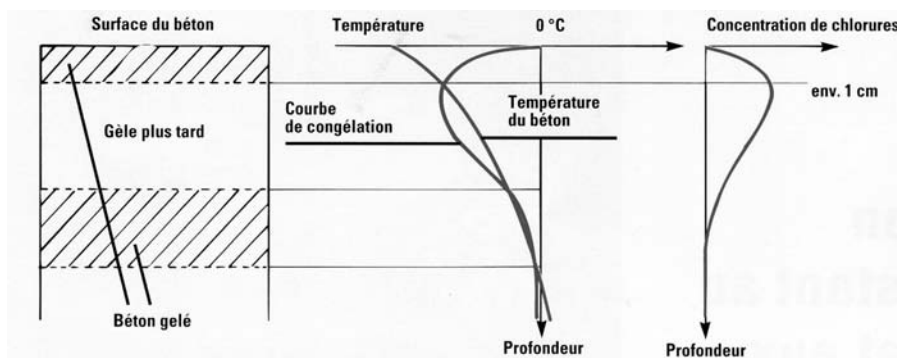


FIGURE A.30: Abaissement de la température du béton lors de l'épandage de sels [Bruehwiler04].

Si le refroidissement se poursuit, la couche intermédiaire gèle également. La pression de congélation qui en résulte ne peut pas s'affaiblir dans les couches voisines déjà gelées, et cela peut conduire à l'éclatement de la couche superficielle (et à des fissures à l'intérieur du béton) [Bruehwiler04].

#### A.5.5.2 Transport de vapeur d'eau

A teneur en humidité relative élevée, voire saturation, tout le réseau est rempli d'eau liquide et cette phase capillaire est continue. Cependant le béton est très vite désaturé par autodessiccation. Dès que les pores se désaturent en surface, un écoulement capillaire s'établit depuis l'intérieur vers l'extérieur du



système poreux. Ainsi, au tout début du séchage, tant que la phase capillaire reste continue et que la perméabilité à l'eau liquide est encore relativement forte, c'est le transfert en phase liquide, provoqué par les forces capillaires qui est prépondérant. Ici, c'est la pression capillaire qui gouverne les mouvements d'eau (Figure A.31) [Barhogel94].

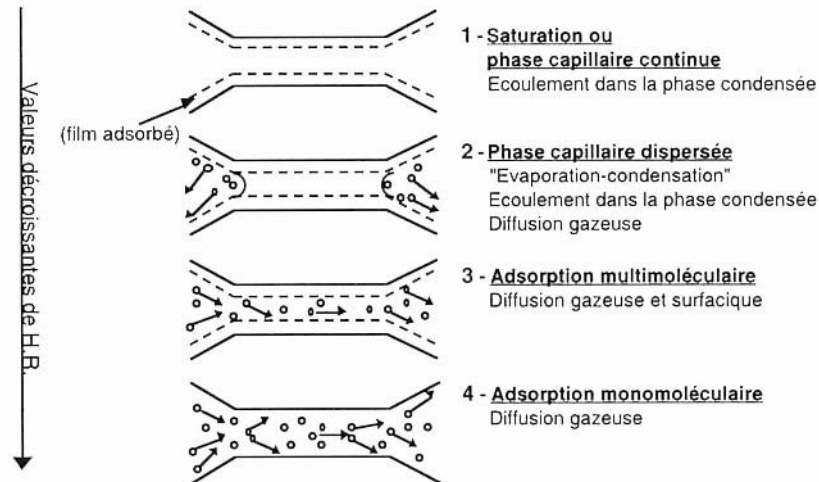


FIGURE A.31: Illustration des quatre types de transfert d'humidité possibles dans un pore cylindrique, selon l'humidité relative de l'air ambiante, H. R. = humidité relative [Barhogel94].

Pour les teneurs en humidité relative intermédiaires, il y a coexistence de la phase gazeuse et de la phase liquide. A mesure que l'humidité relative diminue, les pores se vident et les filets d'eau liquide se rompent. On assiste alors à un phénomène d'évaporation, donc à un transfert par diffusion de l'humidité. L'eau capillaire est présente dans le réseau uniquement dans les pores les plus fins, mais elle ne forme pas une phase continue dans le milieu. En pareil cas, il ne peut y avoir un mouvement d'eau dans ces îlots que suite à un échange par évaporation-condensation de la phase gazeuse, de part et d'autre des ménisques (Figure A.31) [Barhogel94].

Lorsque la teneur en humidité relative est très basse, le transfert en phase gazeuse est dominante (Figure A.31). La vapeur d'eau se diffuse alors dans les pores du béton par trois mécanismes.

- La diffusion moléculaire, mécanisme qui se produit occasionnellement dans les bétons. Il a lieu au niveau des micropores pour des basses humidités relatives. Le champ des forces des parois capture les molécules d'eau pour former la première couche attachée. D'autres molécules d'eau continuent à être en mouvement. Plus l'humidité augmente, plus de couches de molécules recouvrent les parois des pores. Comme résultat, l'espace libre disponible pour la vapeur à l'intérieur des macropores diminue. Quand l'humidité des pores est suffisamment élevée, l'eau adsorbée forme un ménisque au col (connexion entre les larges pores) complètement rempli d'eau. A ce point, les molécules d'eau se condensent à une extrémité et s'évaporent de l'autre côté (Figure A.32 a) [Xi94a].



FIGURE A.32: Diffusion moléculaire de la vapeur d'eau [Puatatsananon02]

- La diffusion Knudsen, qui est un transfert de vapeur dans les mésopores et les micropores dont les dimensions sont très petites par rapport au libre parcours moyen des molécules dans l'air. Les parois des pores ont une influence sur les chocs mutuels entre les molécules et ralentissent la diffusion [Xi94a].
- La diffusion de surface, qui a lieu au niveau des mésopores et micropores. Les molécules d'eau n'échappent jamais au champ de force de la surface des pores. Le transport entraîne un processus thermique avec un saut entre les sites d'absorption (Figure A.32 b) [Xi94a].

Le coefficient de perméabilité décrit la capacité d'un gaz, à traverser un milieu poreux. Avec l'hypothèse d'un écoulement laminaire, le coefficient de perméabilité d'un gaz peut être écrit en tenant compte de sa viscosité (EQ. A.17) [Zagar55] [Kropp95].

$$K_g = \eta \cdot \frac{Q \cdot l}{t \cdot A} \cdot \frac{2 \cdot p}{(p_1 - p_2) \cdot (p_1 + p_2)} \quad (EQ. A.17)$$

$K_g$	[m <sup>2</sup> ] coefficient de perméabilité du gaz,
$\eta$	[Ns/m <sup>2</sup> ] viscosité du gaz,
$Q$	[m <sup>3</sup> ] volume du gaz en transit,
$l$	[m] profondeur de pénétration du gaz,
$A$	[m <sup>2</sup> ] section de pénétration du gaz,
$p$	[N/m <sup>2</sup> ] pression à laquelle le volume du gaz en transit est mesuré,
$p_1$	[N/m <sup>2</sup> ] pression du gaz entrant,
$p_2$	[N/m <sup>2</sup> ] pression du gaz sortant,
$t$	[s] temps.

La loi de Darcy utilise le coefficient de perméabilité (EQ. A.18) [Hearn05]. La partie de droite de l'égalité (EQ. A.18) représente le flux de gaz et la partie de gauche représente la variation spatiale du gaz. La loi de Darcy relie la vitesse d'écoulement laminaire d'un fluide ou d'un gaz, dans un milieu uniforme, continu et isotrope, au gradient de pression hydrostatique donnant naissance à l'écoulement.

$$\frac{dq}{dt} \cdot \frac{1}{A} = K_g \cdot \frac{\Delta p}{L} \quad (EQ. A.18)$$

$q$	[m <sup>3</sup> ] quantité de gaz,
$\Delta p$	[N/m <sup>2</sup> ] différence de pression du gaz.

La loi de Darcy s'applique à chacune des phases des liquides ou des gaz contenus dans les pores du béton. Cependant, l'hypothèse est souvent faite que la phase gazeuse se trouve à pression uniformément distribuée dans le béton d'enrobage à pression atmosphérique. Ainsi, le flux de vapeur d'eau peut être modélisé par la loi de Fick qui simule un processus de diffusion (§ 3.1.4). Ce processus de diffusion représente un flux dû à un gradient de concentration.

Le coefficient de diffusion de vapeur d'eau, utilisé par la loi de Fick, varie en fonction de la température et de l'humidité relative déjà présent dans les pores [Xi94] [Mensi88] [Sakata83]. La teneur en eau dans le béton ne dépend pas linéairement de l'humidité relative présente dans les interstices du béton. Plusieurs modèles existent et les paramètres de ces modèles nécessitent une validation par des essais en laboratoire. La détermination de la prise d'eau d'une éprouvette ne suffit pas pour valider un modèle, aussi la variation spatiale dans le béton d'enrobage est nécessaire pour la validation de ces modèles.

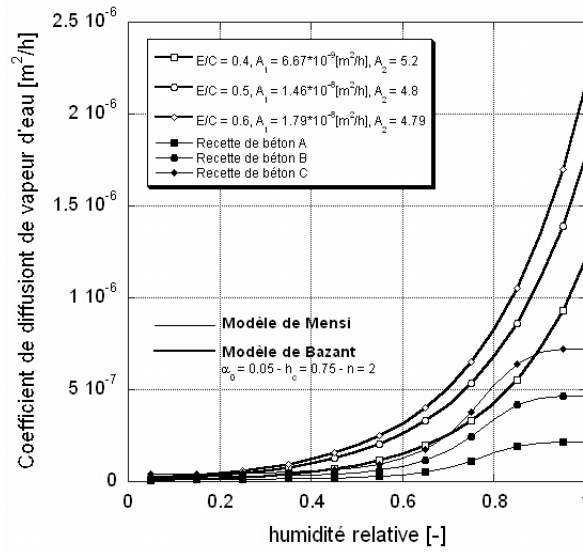


FIGURE A.33: Coefficient de diffusion de vapeur d'eau obtenu à travers les deux modèles de Mensi et de Bazant, les paramètres de la loi de Mensi sont tirés de la littérature [Wittmann89], bétons de perméabilité A, et C voir (§ 3.2).

Le modèle de Sakata prend en considération un facteur de surface, le rapport massique de l'eau sur le ciment et la teneur en eau basée sur quatre différents paramètres (EQ. A.19) [Sakata83].

$$D_w = K_0 + \frac{K_s - K_0}{1 + \left( \frac{100 - H}{100 - C_c} \right)^{n_0}} \quad (EQ. A.19)$$

- $K_0, K_s, C_c$  et  $n_0$  paramètres provenant d'un ajustement selon les essais en laboratoire,  
 $D_w$  [ $m^2/h$ ] coefficient de diffusion de la teneur en eau dans le béton,  
 $H$  [%] humidité relative dans les pores du béton.

Les modèles de Mensi et de Bazant prennent en considération l'humidité relative dans le béton et la température au moyen de la loi d'Arrhénus. La loi de Mensi est une loi exponentielle (EQ. A.20). Le modèle de Mensi propose des coefficients de diffusion plus faibles à l'état de saturation que le modèle de Bazant (Figure A.33) [Xi94] [Mensi88], car le coefficient de diffusion de vapeur d'eau obtenu est utilisé avec la loi de Fick mettant en application le mouvement de la teneur en eau. Par contre, le modèle de Bazant considère le mouvement de l'humidité relative (§ 3.1.4).

$$D_w = A_1 \cdot e^{A_2 \cdot H} \quad (EQ. A.20)$$

- $A_1$  [ $m^2/h$ ] paramètre de la loi de Mensi,  
 $A_2$  [-] paramètre de la loi de Mensi.

Le potentiel chimique relie la théorie thermodynamique aux mesures d'adsorption et de désorption. A l'équilibre thermodynamique et à une température donnée, les potentiels chimiques de l'eau liquide et sous forme de vapeur sont égaux [Baroghel94] (EQ. A.21, EQ. A.22 et EQ. A.23).

$$\mu_v = \mu_l \quad (EQ. A.21)$$

$$\mu_v = \mu_{v0} + R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{P_v}{P_{v0}}\right) \quad (EQ A.22)$$

$$\mu_l = \mu_{l0} + M \cdot v_{sl} \cdot (P_w - P_{l0}) \quad (EQ A.23)$$

$\mu$  [J/mol] potentiel chimique,  
 $R$  [J/mol.°C] constante des gaz (8.314510),  
 $M$  [g/mol] masse molaire de l'eau,  
 $v_{sl}$  volume spécifique de l'eau liquide,  
 $T$  [°C] température absolue du système,  
 $P_v$  pression partielle de vapeur d'eau,  
 $\mu_{l0}$ ,  $\mu_{v0}$ ,  $P_{l0}$  et  $P_{v0}$  caractérisent un état de référence arbitraire.

L'état de référence est défini tel que la pression de l'eau liquide  $P_{l0}$  soit égale à la pression de vapeur de la phase gazeuse, soit la pression atmosphérique. Et la vapeur d'eau de référence  $P_{v0}$  est égale à la pression de vapeur d'eau à l'état de saturation  $p_{v,s}$  (EQ. A.12). Dans l'état de référence, les potentiels chimiques  $\mu_{l0}$  et  $\mu_{v0}$  sont égaux. L'équation précédente (EQ. A.23) peut s'écrire sous la forme de l'équation de Kelvin (EQ. A.24 et EQ. A.25), en y incorporant les considérations faites ci-dessus ainsi que la définition de l'humidité relative (EQ. A.12) [Baroghel94].

$$M \cdot v_{sl} \cdot (P_w - P_{atm}) = R \cdot T \cdot \ln(h) \quad (EQ A.24)$$

$$-(P_{atm} - P_w) = \frac{R \cdot T \cdot \rho_w}{M} \cdot \ln(h) \quad (EQ A.25)$$

$P_{atm}$  pression atmosphérique,  
 $h$  [-] humidité relative de l'air.

En combinant l'équation de Laplace (EQ. A.16) et l'équation de Kelvin (EQ. A.25), nous obtenons une nouvelle équation appelée équation de Kelvin-Laplace (EQ. A.26) [Baroghel94].

$$\ln(h) = -\frac{2 \cdot \gamma_L \cdot \cos(\theta) \cdot M}{R \cdot T \cdot \rho_w \cdot r} \quad (EQ A.26)$$

Dans un pore cylindrique de rayon  $r$ , un adsorbable tel que la vapeur d'eau peut se condenser à une pression inférieure à sa pression de vapeur saturante pour la température considérée. Afin de comprendre le phénomène de condensation capillaire, considérons un pore cylindrique terminé par un hémisphère. Opérons une expérience d'adsorption à pression croissante. Au début, à basse pression, il y a adsorption, c'est à dire formation de couches adsorbées sur la paroi du pore. Puis à la pression  $P_v$  qui, d'après l'équation de Kelvin-Laplace correspond au rayon de courbure du film adsorbé au fond du pore, il se produit une condensation dite capillaire, c'est à dire une formation massive de liquide. Autrement dit, lorsque l'on se trouve à l'humidité relative  $h$ , il y a condensation capillaire. Dans tous les pores du

matériau de rayon  $r$  inférieur au rayon de Kelvin  $r_k$  (EQ. A.27), ceci, lorsque le liquide est parfaitement mouillant, c'est à dire  $\cos(\theta) = 1$  (EQ. A.28 et Figure A.26) [Baroghel94].

$$r < r_k = -\frac{2 \cdot \gamma_L \cdot \cos(\theta) \cdot M}{R \cdot T \cdot \rho_w \cdot \ln(h)} \quad (EQ A.27)$$

$$r < r_k = -\frac{2 \cdot \gamma_L \cdot M}{R \cdot T \cdot \rho_w \cdot \ln(h)} \quad (EQ A.28)$$

$r_k$  rayon de Kelvin.

### A.5.5.3 Transport d'eau par capillarité

Le débit du liquide, lorsque ce dernier a pénétré le matériau d'une longueur  $x$ , peut s'écrire avec la loi de Poiseuille. Le mouvement de l'eau est considéré horizontal, une extrémité communiquant avec un liquide et l'autre extrémité avec l'air (EQ. A.29). Si le pore est vertical, le poids du liquide doit être pris en considération. La plupart du temps, il est négligeable dans les pores capillaires fins rencontrés dans le béton [Courard99].

$$Q = \frac{\pi \cdot p_m \cdot r^4}{8 \cdot \eta \cdot x} \quad (EQ A.29)$$

$p_m$  [ $m^3/s$ ] pression motrice due aux forces capillaires,

$r$  [m] rayon du pore capillaire,

$\eta$  [ $Ns/m^2$ ] viscosité d'un liquide,

$x$  [m] longueur de pénétration d'un liquide,

$Q$  [ $m^3$ ] débit d'un liquide.

La pression motrice  $p_m$  prend en considération l'angle de contact et la tension superficielle (§ A.5.3.4, § A.5.3.5 et EQ. A.30).

$$p_m = \frac{2 \cdot \gamma_L \cdot \cos(\theta)}{r} \quad (EQ A.30)$$

En tenant en compte des tensions superficielles, le débit peut encore s'écrire sous la forme suivante (EQ. A.31) [Courard99].

$$Q = \frac{\pi \cdot \gamma_L \cdot \cos(\theta) \cdot r^3}{4 \cdot \eta \cdot x} \quad (EQ A.31)$$

Le débit peut également s'écrire en fonction du temps ( $dt$ ) nécessaire pour traverser un volume élémentaire ( $dV$ ) du pore capillaire (EQ. A.32) [Courard99]. Le pore capillaire est représenté par un vide de forme cylindrique.

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot dx}{dt} \quad (EQ A.32)$$

$dV$  [ $m^3$ ] volume élémentaire.

En égalant les deux dernières équations (EQ. A.31 et EQ. A.32), on obtient une équation sous la forme différentielle (EQ. A.33) [Courard99].

$$x \cdot \frac{dx}{dt} = \gamma_L \cdot \frac{r \cdot \cos(\theta)}{4 \cdot \eta} \quad (EQ. A.33)$$

A température constante, il est possible de considérer l'angle de contact  $\theta$  et la tension superficielle  $\gamma_L$  comme constante. L'équation de Washburn peut être obtenue en intégrant cette dernière équation (EQ. A.34) [Courard99].

$$L_c^2 = \frac{r \cdot \gamma_L \cdot \cos(\theta)}{2 \cdot \eta} \cdot t \quad (EQ. A.34)$$

$L_c$  [m] profondeur de pénétration du front d'eau.

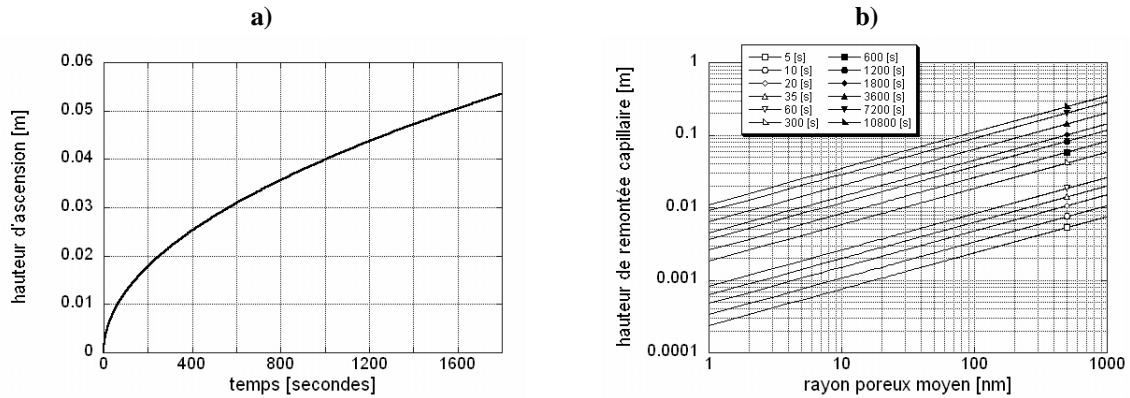


FIGURE A.34: Remontée capillaire  $L_c$  calculée [Courard99],  $\gamma_L = 0.0729$  [J/m<sup>2</sup>],  $\theta = 51^\circ$ ,  $\eta = 0.001002$  [Ns/m<sup>2</sup>], a) Evolution temporelle dans la pâte de ciment  $r = 136$  [nm], b) Evolution en fonction du rayon poreux moyen et du temps.

Si on assimile un corps poreux à un faisceau de pores capillaires de différents diamètres, disposés perpendiculaires à la surface d'un liquide, celui-ci sera aspiré avec une force attractive plus élevée par les petits pores capillaires, mais pénétrera plus rapidement et en plus grande quantité dans les pores plus gros. Ainsi chaque pore capillaire agit comme un ventouse dont la force de succion est inversement proportionnelle à son rayon (Figure A.34) [Courard99].

La forme des pores capillaires, leur extrémité et leur connectivité ont une grande importance sur le comportement capillaire global [Kinloch87]. La valeur de l'angle de contact n'est pas constante dans le temps. Elle diminue en général avec le temps jusqu'à atteindre une valeur d'équilibre. Cet équilibre est atteint plus rapidement lorsque la température est élevée [Courard99].

La profondeur du front d'eau donne une loi insérant un coefficient de pénétration  $B$  multipliant la racine du temps (EQ. A.35). L'eau totale adsorbée peut également être modélisée par la même loi (EQ. A.36) [Janz97] [Lunk98] [Roelfstra00] [Kamp] [Schiegg02].

$$L_c = \sqrt{\frac{r \cdot \gamma_L \cdot \cos(\theta)}{2 \cdot \eta}} \cdot \sqrt{t} = B \cdot \sqrt{t} \quad (EQ. A.35)$$

$$W_a = A \cdot \sqrt{t} \quad (EQ. A.36)$$

- B [m/s<sup>0.5</sup>] coefficient de pénétration,  
 A [kg/m<sup>2</sup>s<sup>0.5</sup>] coefficient de capillarité,  
 W<sub>a</sub> [kg/m<sup>2</sup>] eau totale adsorbée.

La relation entre le coefficient de pénétration et le coefficient de capillarité fait intervenir la masse volumique et la porosité du béton (EQ. A.37).

$$A = \rho_w \cdot \varepsilon \cdot B \quad (EQ. A.37)$$

- $\varepsilon$  [-] volume des pores sur le volume total du béton,  
 $\rho_w$  [kg/m<sup>3</sup>] masse volumique de l'eau.

Le coefficient de capillarité montre une diminution avec la teneur en eau initiale (Figure A.35) [Janz97].

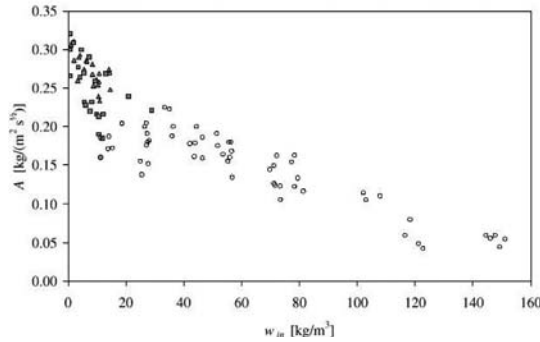


FIGURE A.35: Coefficient d'adsorption A, mesuré expérimentalement [JANZ97] en fonction de la teneur en eau initiale  $w_{in}$ .

Il est possible de relier le coefficient de capillarité au coefficient de diffusion (EQ. A.38) utilisé dans la loi de Fick (§ 3.1.4). La loi de Fick met en relation dans ce cas la teneur en eau dans le béton [Künzel95].

$$D_w = 3.8 \cdot \left( \frac{A}{w_{sat}} \right)^2 \cdot 1000 \frac{w}{w_{sat}}^{-1} \quad (EQ. A.38)$$

- $D_w$  [m<sup>2</sup>/s] coefficient de diffusion de la teneur en eau dans le béton,  
 $w_{sat}$  [kg/m<sup>3</sup>] teneur en eau, à l'état saturé, rapportée au volume du béton,  
 $w$  [kg/m<sup>3</sup> béton] teneur en eau du béton.

En utilisant la loi de Fick, l'évolution spatiale de l'eau dans le béton présente une courbe concave. Par contre, si on compare avec des résultats provenant d'essais, ces courbes sont plutôt convexes (Figure A.36 a) [Künzel95] [Lunk98]. Ceci à amener au développement d'un nouveau modèle développé dans le cadre de ce travail de recherche afin de prendre en considération ces résultats d'essais. De plus, des essais complémentaires, effectués en laboratoire dans le cadre de ce travail de recherche, permettent de valider le modèle.

Pour des températures positives, la température ne semble avoir aucun effet sur le coefficient de capillarité (Figure A.36 b) [Mukhopadhyaya02].

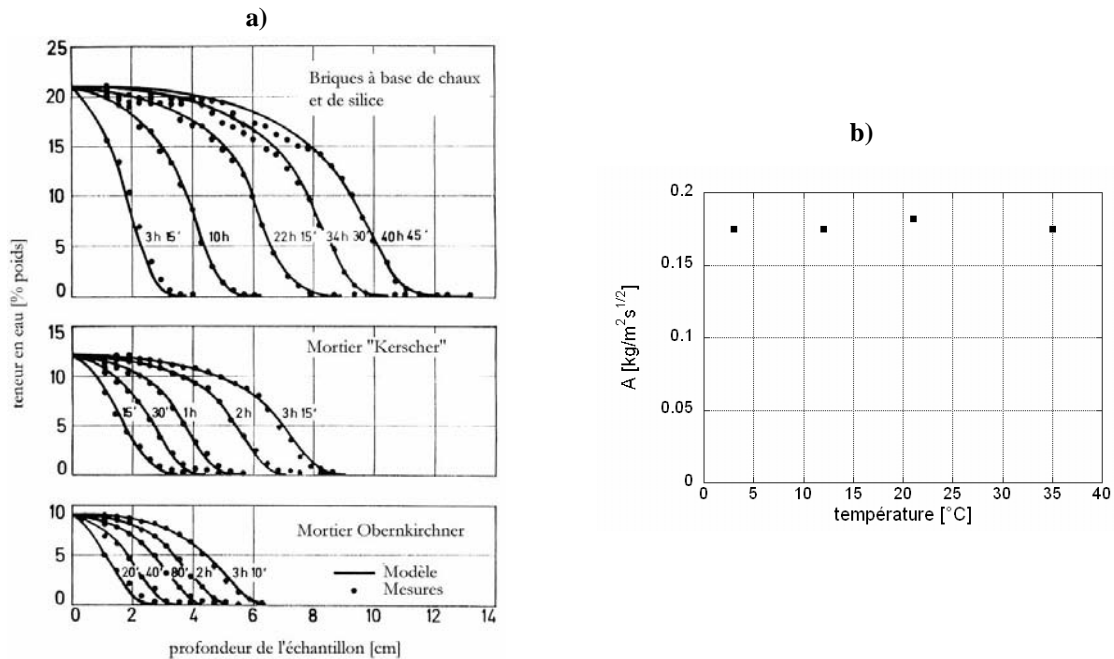


FIGURE A.36: a) Simulations et mesures de l'évolution spatiale de l'eau par succion capillaire dans les briques et différents mortiers [Künzel95], b) Relation entre le coefficient de capillarité et la température [Mukhopadhyaya02].

#### A.5.5.4 Influences climatiques

Les cycles journaliers de température, plus froides la nuit et chaudes durant la journée, présentent des variations différentes de l'humidité relative de l'air, que de l'humidité présente dans le béton. Dans l'atmosphère, l'humidité relative diminue, lorsque la température augmente. Par contre dans le béton, l'effet inverse se produit. Lorsque la température augmente, l'évaporation d'eau liquide augmente également, il s'en suit une augmentation de l'humidité relative dans les pores (Figure A.37) [Andrade99].

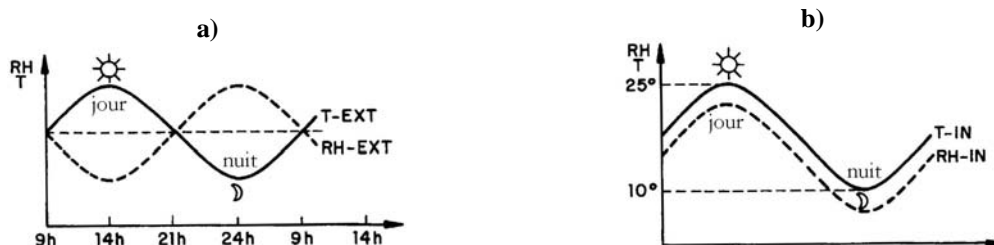


FIGURE A.37: Représentation schématique du changement de température et de l'humidité relative [Andrade99] a) dans l'atmosphère, b) dans le béton.

La différence entre les périodes estivales et hivernales est également mise en évidence par les courbes d'adsorption (Figure A.38). En période hivernale, la température moyenne basse engendre des teneurs en eau plus importantes qu'en période estivale. Si l'on reporte ces valeurs dans un diagramme psychrométrique, les pores sont plus proches de l'état de saturation en période hivernale (Figure A.38) [Andrade99] [Andrade02].



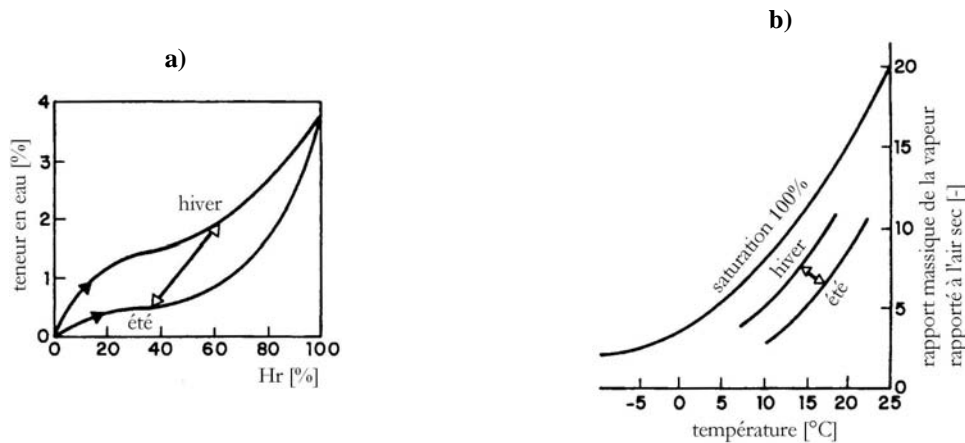


FIGURE A.38: Evolution de l'humidité relative et de la température en relation avec le cycle saisonnier annuel par une représentation a) d'une courbe d'adsorption, b) et un diagramme psychrométrique [Andrade99].

### A.5.6 Isothermes d'adsorption et de désorption dans les pores du béton

L'isotherme d'adsorption et de désorption dépend essentiellement de la quantité de ciment, du rapport massique de l'eau sur le ciment, et de l'âge ou de son degré d'hydratation. La fonction de rétention dans les pores du béton peut être décomposée en trois zones [Petre00] [Meijers03] [Xi94] [Roelfstra00] [Hansen86] [Ayano00].

- Lorsque l'humidité relative dans les pores est inférieure à 95%, l'isotherme d'adsorption ou de désorption est facilement mesurable.
- Lorsque l'humidité relative dans les pores est supérieure à 95%, et que les gradients de pression sont faibles, certains pores sont remplis d'eau liquide tandis que dans d'autres l'eau est combinée avec des bulles d'air. La succion est contrôlée par les pores les plus grands. Dans ce cas, la mesure expérimentale est difficile due aux fortes incertitudes sur le taux de bulles d'air.
- Pour une humidité relative très grande, soit proche des 100% et que l'on impose un fort gradient de pression, il est possible de remplir tous les pores. Par convention, l'évolution de la teneur en eau est représentée souvent par une droite verticale.

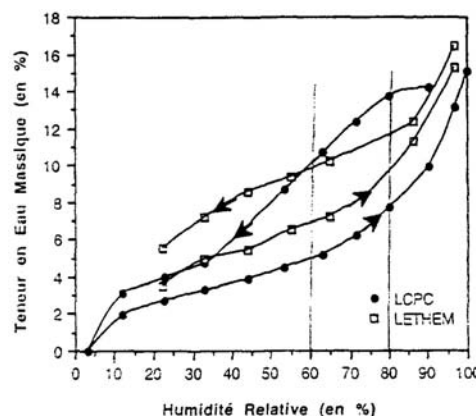


FIGURE A.39: Isotherme d'adsorption et de désorption obtenue sur une pâte de ciment durci. [Baroghel97]. Les termes LCPC et LETHEM représentent deux lieux d'essais différents en France (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées à Paris, Laboratoire d'Etudes Thermiques et Mécaniques à Toulouse) où la température des essais fut respectivement de 23°C et de 20°C.

Des essais montrent que les isothermes d'adsorption sont identiques pour tous types de bétons si l'humidité relative est inférieure à 44% [Baroghel97]. Dans les zones entre 44% et 90%, l'influence de

la composition du béton est importante. Les recettes de béton ayant un rapport massique faible adsorbent peu d'eau dans cette zone d'humidité [Petre00].

Les branches d'adsorption et de désorption des courbes de teneur en eau présentent une hystérésis sur la zone discutée précédemment. L'hystérésis s'accroît si le rapport massique de l'eau sur le ciment est diminué. Ceci peut s'expliquer par l'intercalation partiellement réversible de l'eau adsorbée dans les feuillettes de silicate de calcium hydraté (§ A.4.1). L'hystérésis diminue après plusieurs cycles de mouillage et de séchage du à un endommagement interne et des changements structuraux irréversibles (Figure A.39) [Petre00].

Les courbes isothermes de désorption (Figure A.40) [Hundt75] et d'adsorption (Figure A.38 a) sont influencées par l'énergie thermique.

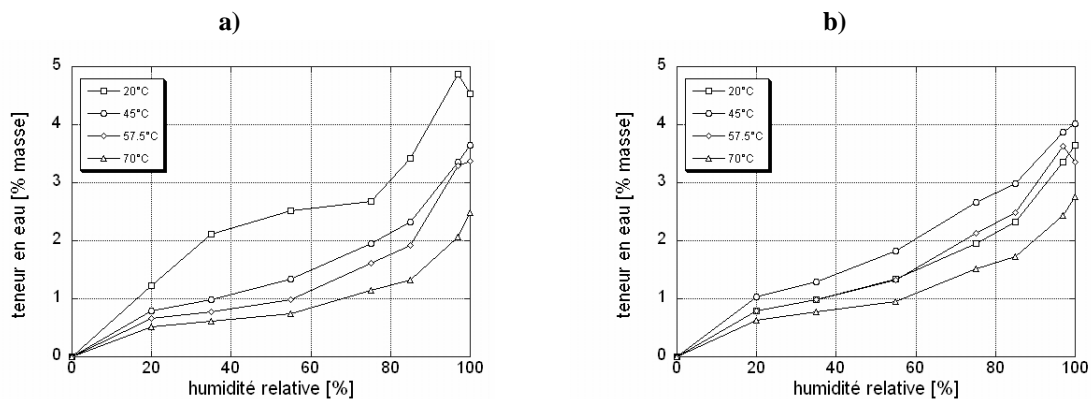


FIGURE A.40: Isotherme de désorption du béton [Hundt78], a) avec ajout de calcite, b) avec ajout de sable.

#### A.5.7 Transfert ionique du chlore dans le béton

Outre la présence des ions chlorures provenant de l'épandage des produits de déverglaçage ou émanant d'un milieu marin, les ions chlorures peuvent déjà être présents lors de la confection du béton, par exemple, sous forme de granulats contaminés par les chlorures, inclusion accidentelle par des agrégats exposés à l'eau de mer, dans l'utilisation d'adjuvant chloré pour les accélérateurs de prise, comme les chlorures d'aluminium, les chlorures de calcium ou les chlorures de sodium et/ou par l'eau de gâchage provenant de la mer [Laferriere05].

Les simulations, couramment utilisées pour le transfert des ions chlorures dans le béton, se modélisent par la loi de diffusion de Fick. A partir de cette loi le transfert ionique, thermique, hydrique sont très souvent simulés (§ 3.1.1). Pour obtenir cette loi de diffusion de Fick, le potentiel chimique peut être écrit sous la forme suivante (EQ. A.39) [Tang96].

$$\mu = \mu_0 + R \cdot T \cdot L \cdot \ln(\gamma \cdot c_f) \quad (EQ. A.39)$$

$\mu$  [J/mol] potentiel chimique,

$\mu_0$  [J/mol] potentiel chimique initial,

$\gamma$  coefficient d'activité,

$R$  [J/mol.°C] constante des gaz (8.314510),

$T$  [K] température absolue du système,

$c_f$  [kg/m<sup>3</sup>] concentration en ions chlorures libres rapporté à la solution liquide.

Les ions chlorures se déplacent le long de ce gradient chimique. Le déplacement des ions chlorures induit un champ magnétique. Le champ magnétique se dirige en sens inverse du déplacement des ions

chlorures. Ainsi, la vitesse moyenne de déplacement des ions chlorures peut se formuler ainsi (EQ. A.40) [Tang96].

$$v_{Cl} = -B \cdot \frac{\partial \mu}{\partial x} + u \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} = -B \cdot R \cdot T \cdot \left( \frac{\partial}{\partial x} \ln(c_f) + \frac{\partial}{\partial x} \ln(\gamma) \right) + u \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} =$$

$$= -B \cdot R \cdot T \cdot \frac{\partial}{\partial x} \ln(c_f) \cdot \left( 1 + \frac{\partial}{\partial \ln(c_f)} \ln(\gamma) \right) + u \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x}$$
(EQ A.40)

$v_{Cl}$  [m/s] vitesse moyenne des ions chlorures,

$B$  facteur de proportionnalité,

$x$  [m] distance,

$u$  [m<sup>2</sup>/sV] mobilité des ions,

$\phi$  [V] champ électrique.

Le flux des ions chlorures peut être écrit sous la forme suivante, en remplaçant les variables  $B$ ,  $R$ ,  $T$  par le coefficient de diffusion (EQ. A.41) [Tang96].

$$J_{Cl} = v_{Cl} \cdot c_f = -D_{Cl} \cdot c_f \cdot \frac{\partial}{\partial x} (\ln(c_f)) \cdot \left( 1 + \frac{\partial}{\partial \ln(c_f)} \ln(\gamma) \right) + u \cdot c_f \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} =$$

$$= -D_{Cl} \cdot \frac{\partial c_f}{\partial x} \cdot \left( 1 + \frac{c_f}{\gamma} \cdot \frac{\partial \gamma}{\partial c_f} \right) + u \cdot c_f \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x}$$
(EQ A.41)

$J_{Cl}$  [kg/m<sup>2</sup>s] flux des ions chlorures,

$D_{Cl}$  [m<sup>2</sup>/s] coefficient de diffusion des ions chlorures.

Il est très difficile de résoudre cette équation différentielle du deuxième degré, et l'expression différentielle du champ électrique (EQ. A.41). Ces deux termes sont souvent négligés, car leurs apports sont petits par rapport au gradient de concentration spatial. On obtient ainsi la formulation générale de la loi de Fick (EQ. A.42) [Tang96].

$$J_{Cl} = -D_{Cl} \cdot \frac{\partial c_f}{\partial x}$$
(EQ A.42)

#### A.5.7.1 Diffusion des ions chlorures dans l'eau

Souvent, les modèles prennent en considération tous phénomènes physico-chimiques en modifiant simplement le coefficient de diffusion de la loi de Fick. Peu d'auteurs différencient la diffusion des ions chlorures dans l'eau et l'entraînement des ions chlorures par l'eau. C'est pourquoi l'incertitude, apportée par ces modèles, est élevée. Ci-après, l'équation de Fick est résolue par une approche simplifiée utilisant la loi erf, une fonction d'erreur dans l'approche probabiliste (§ 4.1). Cette approche fournit la solution exacte lorsque les conditions de bord, les conditions initiales et le coefficient de diffusion sont constants durant toute la simulation. Cette simplification convient parfaitement pour les ouvrages complètement immergés, sans mouvement d'eau et où seul, la diffusion des ions chlorures dans l'eau est activée. Ainsi, l'équation précédente (EQ. A.42) prend la forme différentielle du deuxième ordre, appelée seconde loi de Fick (EQ. A.43) [Tang96].

$$\frac{\partial c_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{Cl} \cdot \frac{\partial c_f}{\partial x} \right) \quad (EQ A.43)$$

$t$  [s] temps.

En choisissant des conditions de bord, des conditions initiales et un coefficient de diffusion constants, la formulation simplifiée peut être écrite comme soit (EQ. A.44) [Taheri98] [Tang96] [Lindvall01] [Roelfstra00] [Roelfstra01] [Hansen97] [Hansen99] [Kassir01] [Stanish02] [DiMaio04] [Siemes98] [Amey98] [Xi00] [Helland04] [Tumidajski96] [Mangat94] [Chatterji95] [Castellote01] [Prezzi96] [Halamickova95] [Lay03] [Paramsivam02] [Tanaka02].

$$c_f(x, t) = c_{f,i} + (c_{f,sa} - c_{f,i}) \cdot \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_{Cl} \cdot t}} \right) \right] \quad (EQ A.44)$$

$c_{f,i}$  [kg/m<sup>3</sup>] concentration des ions chlorures au temps  $t = 0$ ,

$c_{f,sa}$  [kg/m<sup>3</sup>] concentration des ions chlorures, conditions de bord,

$\operatorname{erf}$  fonction d'erreur.

Un autre modèle, proche des modèles de carbonatation, est également proposé. Dans ce cas, la profondeur du front d'ions chlorures évolue linéairement avec la racine du temps (EQ. A.45) [Colleparidi82].

$$x_{Cl} = 4 \cdot \sqrt{D_{Cl} \cdot t} \quad (EQ A.45)$$

$x_{Cl}$  [m] profondeur du front des ions chlorures.

Pour des expositions différentes, comme dans les zones d'épandage de produits de déverglaçage ou dans les zones d'éclaboussures sur les ouvrages ou lorsque le coefficient de diffusion varie, ces dernières équations devraient être utilisées à seuls fins d'obtenir un ordre de grandeur de la solution [Tang96]. Néanmoins beaucoup d'auteurs utilisent ces dernières équations en faisant varier le coefficient de diffusion. Ce dernier est développé ultérieurement.

La quantité d'eau présente dans les pores capillaires du béton est prise en compte dans le coefficient de diffusion des ions chlorures (EQ. A.46) [Climent02]. Le plus souvent, les modèles utilisent la loi de Bazant (EQ. A.91).

$$D_{Cl} = 1.068 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{w}{w_{sat}} - (3.496 \cdot 10^{-12}) \quad (EQ A.46)$$

$w$  [kg/m<sup>3</sup> béton] teneur en eau du béton,

$w_{sat}$  [kg/m<sup>3</sup>] teneur en eau, à l'état saturé, rapportée au volume de béton.

Les granulats influencent également le mouvement des ions chlorures dans le béton. Ceci est pris en compte par un coefficient de diffusion propre aux granulats (EQ. A.47). Les coefficients de diffusion

dans les agrégats sont très faibles, sauf le cas où les agrégats présentent des défauts internes tels que fissuration ou porosités exceptionnelles [Hobbs99].

$$D_{Cl} = \frac{[(D_a - D_p) \cdot V_a + (D_a + D_p)] \cdot D_p}{(D_p + D_a) + (D_p - D_a) \cdot V_a} \quad (EQ A.47)$$

$D_a$  [m<sup>2</sup>/s] coefficient de diffusion des ions chlorures dans les agrégats,

$D_p$  [m<sup>2</sup>/s] coefficient de diffusion des ions chlorures dans la pâte de ciment,

$V_a$  [-] concentration d'agrégats dans le béton.

La composition de la recette de béton est un facteur essentiel quant au déplacement des ions chlorures dans le béton (Figure A.41).

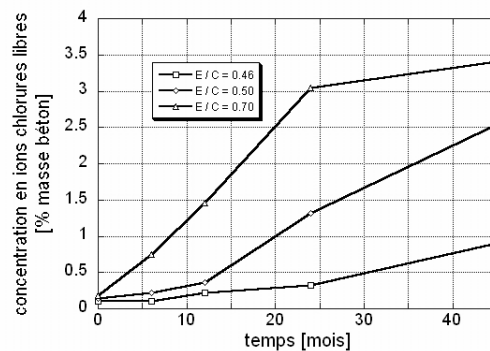


FIGURE A.41: Influence du rapport massique de l'eau sur le ciment sur la concentration des ions chlorures exposée à une atmosphère en milieu marin, évolution temporelle de la concentration en ions chlorures à 34 [mm] dans le béton d'enrobage [PechCanul02].

L'influence des cendres volantes et celle du type de ciment sont également prises en considération par le coefficient de capillarité [Hunkeler02]. Les essais ont été effectués sur des bétons de classe C20 et C40 avec différentes teneurs en cendres volantes (la valeur numérique 20 ou 40 correspond à la valeur du fractile de 5% de la résistance à la compression sur cylindre à 28 jours en [N/mm<sup>2</sup>]) (Figure A.42 a) [Jones93]. La quantité de ciment dans la recette du béton n'influence que peu le coefficient de capillarité (Figure A.42 b) [Buenfeld98].

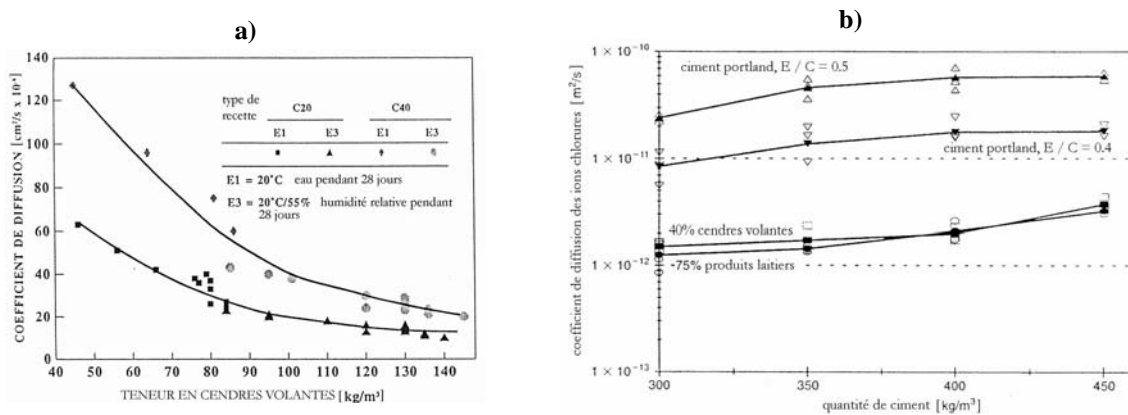


FIGURE A.42: Influence du type de ciment sur le coefficient de diffusion des ions chlorures a) Influence de la teneur en cendres volantes [Jones93], b) Influence de la quantité de ciment, des cendres volantes et des produits laitiers [Buenfeld98].

La fumée de silice diminue la perméabilité du béton. Les coefficients de diffusion sont donc inférieurs à ceux d'un béton conventionnel (EQ. A.48) (Figure A.43 a) [Bentz00] [Maage94].

$$\frac{D_{Cl}}{D_{Cl,FS}} = 10^{-(8.374 - (43.15 \cdot \alpha) + 23.15 \cdot E/C) \cdot FS + 15.36 \cdot FS} \quad (EQ. A.48)$$

$D_{Cl,FS}$  [m<sup>2</sup>/s] coefficient de diffusion des ions chlorures dans un béton avec ajout de fumée de silice,

FS [%] taux d'addition de fumée de silice rapporté à la masse de ciment,

E/C [-] rapport massique de l'eau sur le ciment,

$\alpha$  [-] degré d'hydratation du béton.

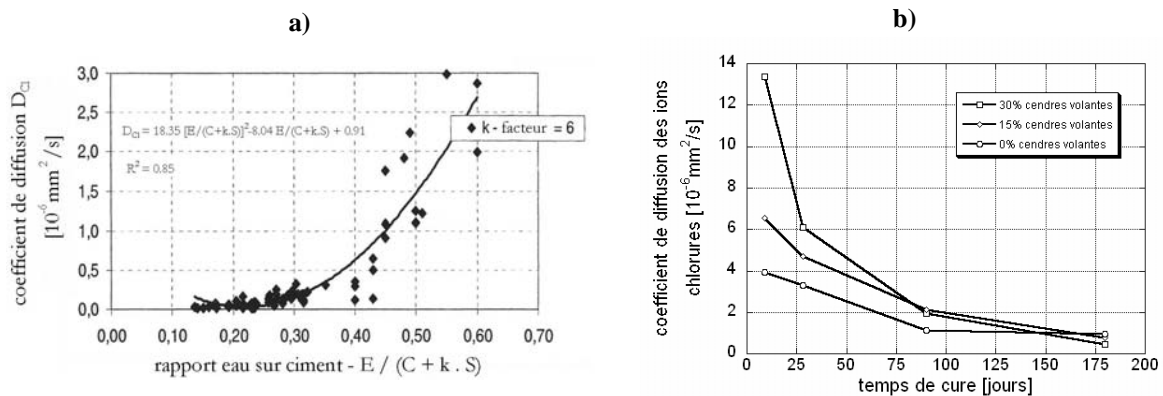


FIGURE A.43: a) influence du rapport massique de l'eau sur le ciment et fumée de silice sur le coefficient de diffusion des ions chlorures [Lindgard03], b) influence du temps de cure sur le coefficient de diffusion des ions chlorures [Hossain03].

De plus, l'importance de la cure n'est pas à négliger pour les caractéristiques de perméabilité du béton. En effet, les valeurs des coefficients de diffusion peuvent fluctuer d'un facteur de 10 (Figure A.43 b) [Hossain03]. Les caractéristiques de perméabilité du béton au jeune âge change rapidement, ainsi le coefficient de diffusion diminue avec le mûrissement du béton (EQ. A.49, EQ. A.50) [Hansen97].

$$D_{Cl} = D_{Cl,i} \cdot t^{-m} \quad (EQ. A.49)$$

$$m = 2.5 \cdot (E/C) - 0.6 \quad (EQ. A.50)$$

$D_{Cl,i}$  [m<sup>2</sup>/s] coefficient de diffusion des ions chlorures au temps  $t = 0$ ,

$m$  paramètre tenant compte de la composition du béton.

L'exposition de l'ouvrage aux intempéries influence également le transport d'eau par succion capillaire (Tableau A.6) [Hunkeler02]. Cette influence est prise en considération en modifiant le coefficient de diffusion de capillarité.

Classes d'exposition	Epaisseur d'enrobage des acier d'armature	
	40 à 50 [mm]	70 à 80 [mm]
<b>XD1</b>	$< 20 \cdot 10^{-6}$ [mm <sup>2</sup> /s]	$< 40 \text{ à } 60 \cdot 10^{-6}$ [mm <sup>2</sup> /s]
<b>XD2</b>	pas de résultats de mesure (prendre par défaut XD3)	
<b>XD3</b>	$< 10 \cdot 10^{-6}$ [mm <sup>2</sup> /s]	$< 20 \text{ à } 30 \cdot 10^{-6}$ [mm <sup>2</sup> /s]

TABLEAU A.6: Coefficient de diffusion [mm<sup>2</sup>/s] en fonction de l'exposition de l'ouvrage aux ions chlorures, d'après [Hunkeler02], les classes d'exposition proviennent de la norme européenne SN EN 206-1:2000, avec XD1 partie d'ouvrage exposée au brouillard salin, XD2 partie d'ouvrage mouillée rarement sèche et XD3 partie d'ouvrage exposée aux éclaboussures.

La zone de marnage, c'est-à-dire la zone de mouillage et de séchage continu par les vagues d'un plan d'eau, présente une vitesse d'entrée des ions chlorures rapide par rapport aux zones d'exposition à l'atmosphère marine (Figure A.44) [Kavcic02].

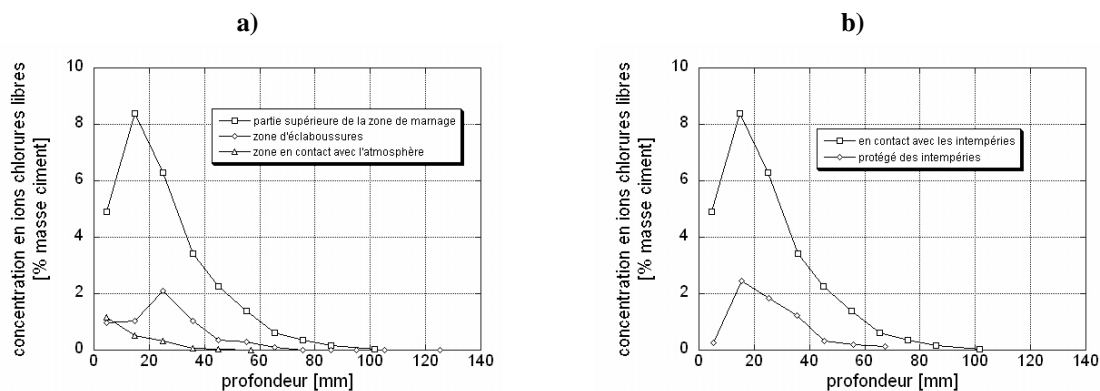


FIGURE A.44: Influence de l'exposition en milieu marin sur la vitesse de pénétration des ions chlorures (éléments de béton de 18 ans d'âge) [Kavcic02] a) Zones d'exposition différentes, b) Zone protégée et en contact avec les intempéries.

Comme déjà mentionnée précédemment, la température influence le transport d'eau par modification du coefficient de diffusion (EQ. A.40 et EQ. A.41). Aussi lorsque la température descend en-dessous de zéro, l'eau dans les pores ne gèle pas en totalité (§ A.5.5.1), ce qui diminue le coefficient de diffusion à basses températures (Figure A.45 a) [Hunkeler02] [Jones94]. Les cycles de gel et dégel conduisent à une microfissuration, voire à une fissuration du béton. Le coefficient de diffusion peut également être augmenté d'un facteur 10 après 300 cycles de gel-dégel [Tanaka02].

Une autre démarche consiste à faire varier le coefficient de diffusion en fonction de la profondeur dans le béton d'enrobage. Pour utiliser également une loi de Fick, une transformation de la variable  $x$  (la profondeur du béton d'enrobage) est nécessaire. On utilise une variable qui prend en considération la profondeur du béton d'enrobage  $x$  divisé par la racine carrée du temps  $t$ . Cette variable est appelée transformation de Boltzmann (Figure A.45 b) [Tumidajski95].

La migration des ions chlorures sous champ électrique est très rapide. L'allure de l'entraînement sous un champ électrique ressemble à l'allure du transport ionique par l'eau par succion capillaire

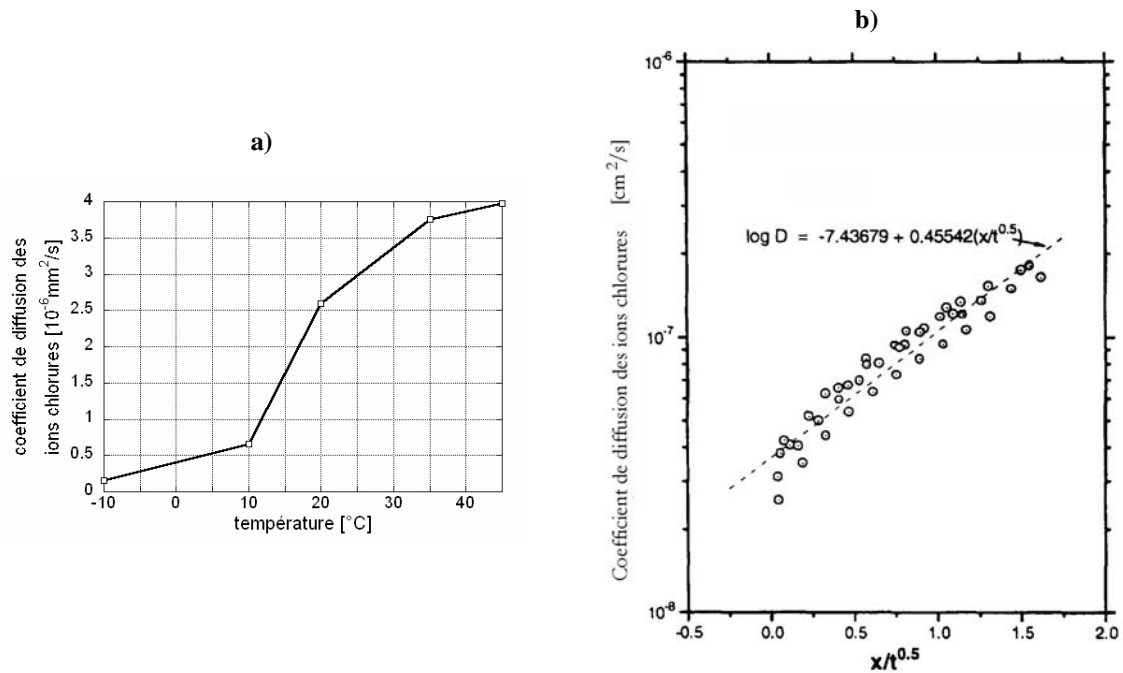


FIGURE A.45: a) Effet de la température sur le coefficient de diffusion pour un béton usuel, d'après [Jones94], b) Coefficient de diffusion en fonction de la variable de transformation de Boltzmann [Tumidajski95].

[Tang96]. Sous un champ électrique, le coefficient de diffusion des ions chlorures prend la forme suivante (EQ. A.51) [Castellote01] [Castellote00] [Tang95a] [Tang99] [Castellote00a].

$$D_{Cl} = \frac{J_{Cl} \cdot R \cdot T \cdot L}{z \cdot F \cdot C_1 \cdot \gamma \cdot \Delta\phi} \quad (EQ. A.51)$$

$D_{Cl}$	$[\text{cm}^2/\text{s}]$ coefficient de diffusion effectif,
$J_{Cl}$	$[\text{mol}/\text{cm}^2\text{s}]$ flux des ions chlorures,
$C_1$	$[\text{mol}/\text{cm}^3]$ concentration des ions chlorures à la cathode,
$\gamma$	coefficient d'activité dans la solution cathodique,
$l$	$[\text{cm}]$ épaisseur de l'éprouvette,
$\Delta\Phi$	$[\text{V}]$ voltage effectif appliqué,
$R$	$[\text{J}/\text{mol} \cdot ^{\circ}\text{C}]$ constante des gaz (8.314510),
$T$	$[\text{K}]$ température absolue,
$z$	nombre de valence de l'ion chlorure,
$F$	$[\text{C}/\text{mol}]$ constante de Faraday ( $9.6485 \cdot 10^4$ ).

#### A.5.7.2 Transport des ions chlorures par l'eau

La succion capillaire doit être considérée comme la cause principale de contamination des bétons par les ions chlorures ceci lorsque des cycles de mouillage et de séchage affecte la partie d'ouvrage étudié. Durant la période de mouillage, le béton adsorbe les ions chlorures par entraînement avec l'eau. Lorsque le béton s'assèche, l'eau s'échappe sous forme de vapeur et les ions chlorures précipitent et demeurent dans les zones proches de la surface. Avec la répétition de ce cycle de mouillage et de séchage, la teneur en ions chlorures augmente et peut même dépasser la concentration mesurée en surface du béton [Kropp95]. Le cycle de mouillage et de séchage est mis en évidence par des essais sur des bétons à faible perméabilité (Figure A.46 a) [Hong00] [Hong99].



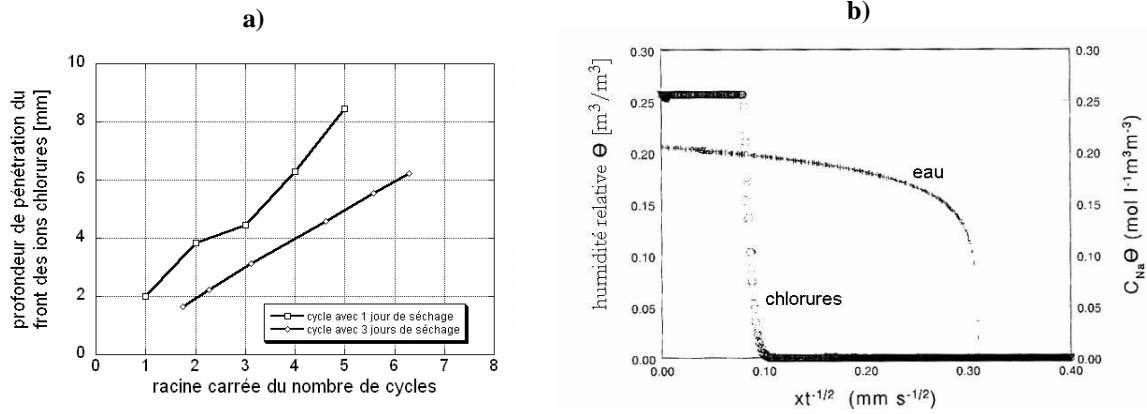


FIGURE A.46: a) Effet du nombre de cycles de mouillage et de séchage sur le front de pénétration d'ions chlorures fixé à une concentration de 0.1% par rapport à la masse de béton, la perméabilité du béton contient 25% de produit laitier [Hong99] [Hong00], b) Simulation de l'avancement du front d'eau et des ions chlorures avec la transformation de Boltzmann sur des briques de silicate de calcium, selon [Pel00].

Des essais sur des briques de silicate de calcium montrent que l'eau influence le transport ionique des chlorures, mais pas d'une manière directe. Les essais mettent en évidence un certain retard de l'avancement du front des ions chlorures par rapport au front de l'eau du à l'adsorption des ions chlorures par les silicates de calcium présents dans la pâte de ciment (§ A.5.7.3 et Figure A.46 b) [Pel00]. Ce retard est mis en évidence dans le béton par un coefficient de retard (EQ. A.52) [Lunk98].

$$R(t) = 1 - \frac{x_{Cl}(t)}{x_w(t)} \quad (EQ. A.52)$$

- R      coefficient de retard selon le modèle de Lunk,  
 $x_{Cl}$     [m] profondeur du front de pénétration des ions chlorures,  
 $x_w$     [m] profondeur du front de pénétration de l'eau,  
t      [s] temps.

Le taux de remplissage des pores ainsi que la capacité de la pâte de ciment d'adsorber les ions chlorures libres sont les principales causes de ce retard. Une relation entre le coefficient de retard et le coefficient de pénétration a été établi (Figure A.47) [Lunk98] [Lunk98a].

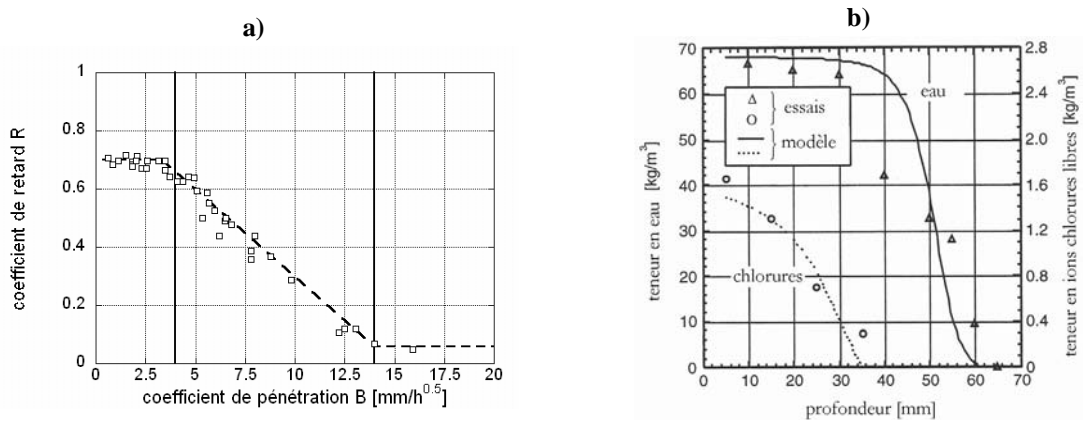


FIGURE A.47: Coefficient de retard [Lunk98], a) influence du coefficient de pénétration, b) mise en évidence du retard du front des ions chlorures par rapport à l'avancement de l'eau.

Quelques valeurs de coefficients de retard sont proposées en fonction du rapport massique de l'eau sur le ciment (Tableau A.7) [Lunk98].

E / C	Coefficient de retard R
0.41	0.60
0.5	0.35
0.45*	0.54 et 0.70*

TABLEAU A.7: Coefficient de retard en fonction du rapport massique de l'eau sur le ciment, \* variation de l'âge du béton (Figure A.48) [Lunk98a].

Le coefficient de retard augmente progressivement pour devenir constant à long terme (Figure A.48) [Lunk98a] [Roelfstra00]. La valeur de ce coefficient R est proposée à 0.55 pour les différentes recettes de béton, lors d'essais effectués en expositions réelles à l'entrée d'un tunnel [Ungricht02]. Cette valeur est limitée au béton d'enrobage sur les 48 premières heures [Ungricht04].

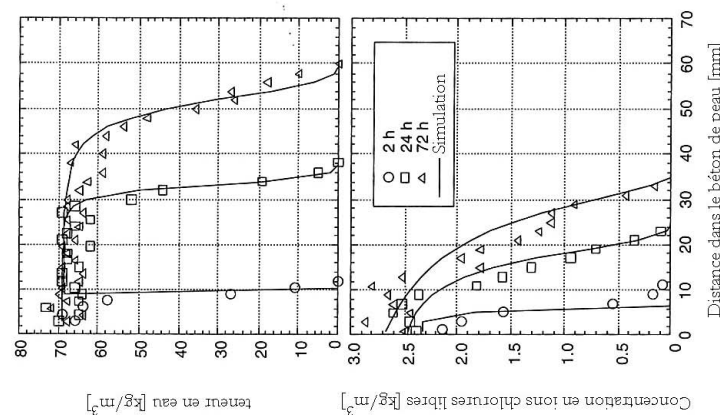


FIGURE A.48: Distribution de chlorures et d'eau dans le béton d'enrobage pour une recette de béton de E / C correspondant à 0.50, temps : 2, 24 et 72 heures [Lunk98a].

En prenant en considération la succion capillaire, cette dernière peut être modélisée grâce au coefficient de capillarité (§ A.5.5.3 et EQ. A.53) [Nilsson96].

$$Q_{Cl} = \frac{c_f}{\rho_w} \cdot A \cdot \sqrt{t} \quad (EQ A.53)$$

- $Q_{Cl}$  [kg/m<sup>2</sup>] quantité d'ions chlorures transportées par succion capillaire de l'eau,
- $c_f$  [kg/m<sup>3</sup>] concentration en ions chlorures libres dans les interstices du béton rapportée au volume de la solution,
- $\rho_w$  [kg/m<sup>3</sup>] masse volumique de l'eau,
- $A$  [kg/m<sup>2</sup>s<sup>0.5</sup>] coefficient de capillarité,
- $t$  [s] temps.

D'autres auteurs proposent des modèles de transport des ions chlorures par l'eau (§ A.5.7.4). Le plus souvent, seule la vapeur d'eau est prise en compte et dans tous les cas, la succion capillaire de l'eau est modélisée par une transformation du coefficient de diffusion utilisé dans la loi de Fick.

Lors d'essais de mouillage et séchage, le temps de cure du béton influence l'entraînement des ions chlorures par l'eau surtout lorsque le nombre de cycles de mouillage et de séchage est faible, par conséquent, l'effet du à la cure du béton reste négligeable à long terme. L'effet d'une mauvaise cure peut être

représenté par l'apparition précoce d'une fissuration fine du béton. La température affecte la rapidité d'entraînement des ions chlorures par l'eau (Figure A.49) [Taheri98] [VanBreugel00a].

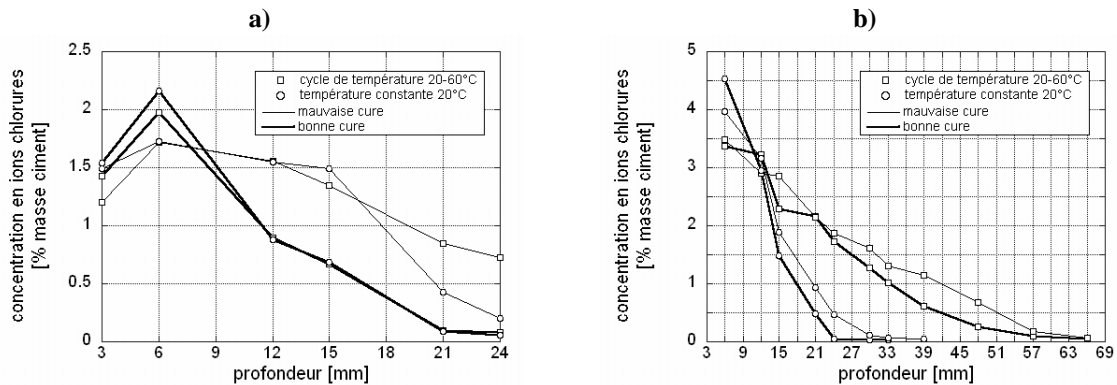


FIGURE A.49: Effets des cycles de mouillage et séchage et de la cure sur une poutre de béton mis en oeuvre à partir d'un ciment portland [Taheri98] a) Après un mois d'exposition et 18 cycles de mouillage et séchage b) Après six mois d'exposition et 87 cycles de mouillage et séchage.

Dans le cas d'épandage de produits de déverglçage sur une chaussée, la grande variation de la concentration en ions chlorures influence particulièrement les simulations. En changeant les conditions de bord (Figure A.50), les prédictions de concentration d'ions chlorures diffèrent également. Par exemple, si on garde des conditions de bord constantes, la durée de service est augmentée de 30%. Après 80 ans de service, les différences entre quatre conditions de bord différentes deviennent négligeables [Paulsson02].

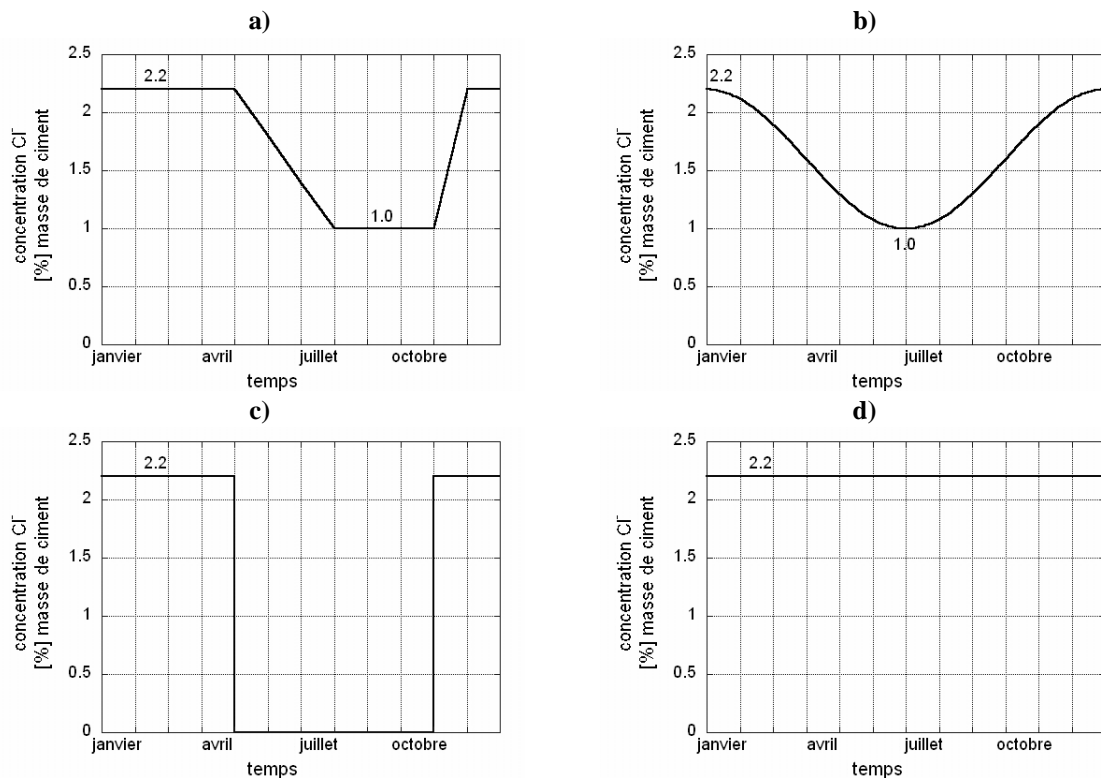


FIGURE A.50: Variation des conditions de bord d'un modèle pour la concentration en ions chlorures [Paulsson02], a) Constantes entre décembre - avril, décroissances linéairement entre mai - juillet, constantes entre août - octobre, augmentant linéairement en novembre b) Sous forme d'une sinusoïdale avec les maxima et minima respectifs au début du mois de décembre et de juillet, c) Constantes entre novembre - avril et pas de chlorures le reste de l'année, d) constantes toute l'année.

### A.5.7.3 Influence de la pâte de ciment sur le transport ionique

La capacité d'adsorption des ions chlorures par la pâte de ciment dépend principalement de la composition chimique du ciment et plus particulièrement de la teneur en aluminat de tricalcium ( $C_3A$ ) [Chaussadent00] contenu dans le clinker et du type d'ajout, telle la fumée de silice et les cendres volantes (Figure A.51) [Kropp95].

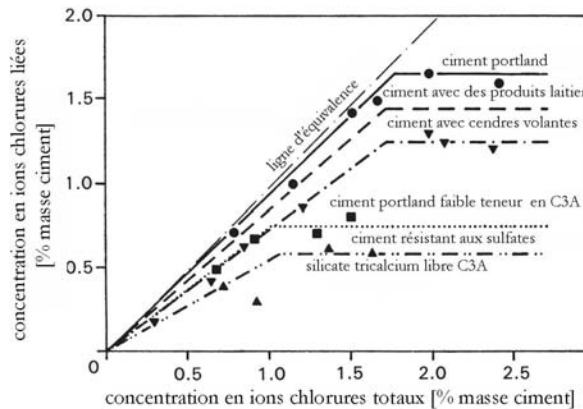


FIGURE A.51: Relation entre les ions chlorures liés à la pâte de ciment et les ions chlorures totaux pour différentes recettes de béton [Kropp95].

La concentration totale d'ions chlorures comprend les ions chlorures libres de se mouvoir dans les interstices du béton et les ions chlorures capturés par la pâte de ciment (EQ. A.54).

$$C = C_F + C_B \quad (EQ. A.54)$$

$C$  [kg/m<sup>3</sup> de béton] quantité de ciment,

$C_F$  [kg/m<sup>3</sup>] concentration en ions chlorures libres dans les interstices du béton rapportée au volume du béton,

$C_B$  [kg/m<sup>3</sup>] concentration en ions chlorures capturées par la pâte de ciment rapportée au volume du béton.

L'équation différentielle de la loi de Fick s'écrit à la base avec les ions chlorures totaux. En utilisant cette dernière équation (EQ. A.54), il est possible réécrire cette équation différentielle sous une autre forme (EQ. A.55).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = w \cdot \frac{\partial c_f}{\partial t} + \frac{\partial c_f}{\partial t} \cdot \frac{\partial c_b}{\partial c_f} = \frac{\partial c_f}{\partial t} \cdot \left( w + \frac{\partial c_b}{\partial c_f} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{Cl,t} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( w \cdot D_{Cl} \cdot \frac{\partial c_f}{\partial x} + D_{Cl,b} \cdot \frac{\partial c_b}{\partial x} \right) \quad (EQ. A.55)$$

$t$  [s] temps,

$x$  [mm] distance dans le béton d'enrobage,

$D_{Cl,t}$  [mm<sup>2</sup>/s] coefficient de diffusion des ions chlorures totaux,

$D_{Cl,b}$  [mm<sup>2</sup>/s] coefficient de diffusion des ions chlorures liés à la pâte de ciment,

$D_{Cl}$  [mm<sup>2</sup>/s] coefficient de diffusion des ions chlorures dans l'eau,

$c_f$  [kg/m<sup>3</sup>] concentration en ions chlorures libres dans les interstices du béton rapportée au volume de la solution,

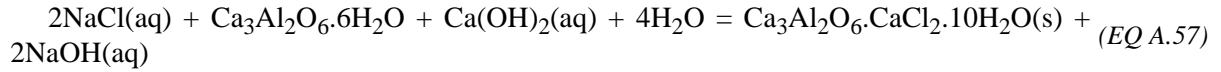
$c_b$  [kg/m<sup>3</sup>] concentration en ions chlorures capturés par la pâte de ciment rapportée au volume de la solution,

$w$  [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>] teneur en eau rapportée au volume du béton.

Le coefficient de capillarité des ions chlorures liés à la pâte de ciment prend la valeur nulle. En isolant la variation temporelle des ions chlorures libres, il est possible d'écrire l'équation différentielle sous la forme suivante (EQ. A.56).

$$\frac{\partial c_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{D_{Cl}}{\left( 1 + \frac{1}{w} \cdot \frac{\partial c_b}{\partial c_f} \right)} \cdot \frac{\partial c_f}{\partial x} \right) \quad (EQ. A.56)$$

Le pH augmente durant la capture des ions chlorures par la pâte de ciment. Cette adsorption des chlorures peut être expliquée par la formule chimique de la formation du sel de Friedel [Justnes96]. Les termes de l'équation chimiques (aq) signifient en solution aqueuse et (s) solide (EQ. A.57).



Plusieurs modèles existent permettant de quantifier la quantité d'ions chlorures liés à la pâte de ciment, comme le modèle linéaire avec une valeur de 0.4 à 0.7 pour le paramètre  $\gamma$  (EQ. A.58) [Tuutti82] [Petre00] [Roelfstra00] [Roelfstra01] [MartinPerez00] [Meijers03].

$$c_b = \gamma \cdot c_f \quad (EQ. A.58)$$

$\gamma$  facteur reliant la concentration d'ions chlorures liées au ions chlorures libres.

Un autre modèle également linéaire, mais affine, est proposé. L'inconvénient de cette formulation est que lorsque la concentration d'ions chlorures libres vaut zéro, la concentration en ions chlorures liés et totaux ne l'est pas, ce qui est évidemment faux (EQ. A.59 et Figure A.52) [Tang96].

$$c_b = \gamma \cdot c_f + \beta \quad (EQ. A.59)$$

$\beta$  [kg/m<sup>3</sup>] facteur reliant la concentration d'ions chlorures liées aux ions chlorures libres rapportés au volume de la solution.

Ainsi un modèle non linéaire semble plus adapté pour simuler une première partie linéaire et une seconde partie constante, soit lorsque la capacité d'adsorption par la pâte de ciment atteint sa limite, comme avec l'isotherme de Langmuir (EQ. A.60) [Tang96] [Yu93] [Sergi92] [Lindvall01] [MartinPerez00] [Glass00] [Glass98].

$$c_b = \frac{\gamma \cdot c_f}{1 + \alpha \cdot c_f} \quad (EQ. A.60)$$

$\alpha$  et  $\gamma$  facteurs de l'isotherme de Langmuir reliant la concentration d'ions chlorures liées au ions chlorures libres.

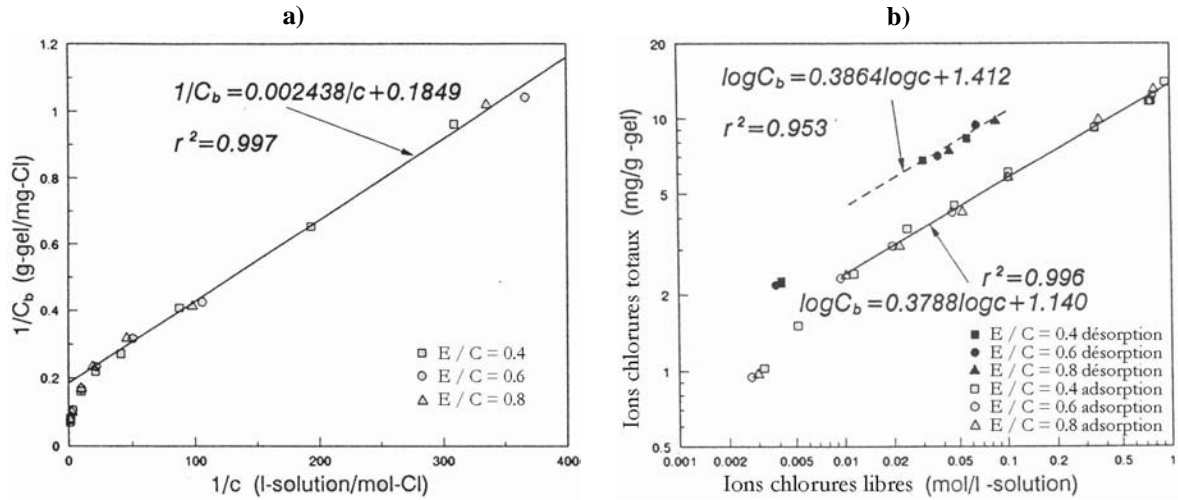


FIGURE A.52: Capacité d'adsorption des ions chlorures par la pâte de ciment [Tang96], a) isotherme de Langmuir, b) isotherme de Freundlich.

L'isotherme de Freundlich prend également en compte ces dernières considérations (EQ. A.61 et Figure A.52) [Tang95] [Lindvall01] [Ritthichauy01] [MartinPerez00] [Oh01] [Tang96c] [Xi99] [Tang96b].

$$c_b = \gamma \cdot c_f^\alpha \quad (\text{EQ A.61})$$

$\alpha$  et  $\gamma$  facteurs de l'isotherme de Freundlich reliant la concentration d'ions chlorures liés au ions chlorures libres.

Quelques variantes existent par rapport aux isothermes de Langmuir et de Freundlich (§ A.5.7.3), dont la prise en compte de la teneur en eau et de la teneur en calcium hydraté (CSH) (EQ. A.62, EQ. A.63 et EQ. A.64) [Xi99] [Ababneh02a] [Tang93] [Puattatsananon02].

$$c_b = \frac{1}{\beta + \frac{1}{\alpha \cdot c_f}} \quad (\text{EQ A.62})$$

$$\alpha = \frac{1.157 \cdot 10^{-2} \cdot B_{\text{CSH}}}{w} \quad (\text{EQ A.63})$$

$$\beta = \frac{0.1849}{B_{\text{CSH}}} \quad (\text{EQ A.64})$$

$\alpha$  et  $\beta$  facteurs de l'isotherme de Freundlich reliant la concentration d'ions chlorures liés au ions chlorures libres,

$B_{\text{CSH}}$  taux de calcium hydraté en fonction du ciment.

Le modèle BET prend en considération d'autres paramètres supplémentaires comme le volume d'adsorbant pour combler la surface des pores de la matrice de la pâte de ciment avec une couche de molécule, le nombre de couches à l'état saturé (§ 3.1.4.1) et la concentration en chlorure de sodium à l'état saturé [Castellote99]. Ce modèle permet finalement de prendre en considération le taux d'ions chlorures liés à la pâte de ciment.

#### A.5.7.4 Différents modèles existants

En dehors des modèles déjà discuté (§ A.5.7.1), deux types de modèles peuvent être utilisés qui prennent en considération respectivement deux échelles différentes : les modèles microscopiques (voir a à e) et les modèles macroscopiques (voir f à j). Les modèles microscopiques prennent en considération les mouvements ioniques dans le béton et leur équilibre chimique dans leur environnement, comme dans les modèles Stadium, Ms Diff, de Masi, de Shin et de Schmidt-Döhl. Les modèles macroscopiques prennent en considération les différents mouvements thermiques, hydriques et ioniques. Les transformations chimiques ne sont prises en considération qu'à travers des paramètres simulant globalement les effets chimiques sur le transport, comme les modèles de Roelfstra, TransChlor, ClincConc, de Meijers, de Saetta, d'Ishida.

Si les modèles microscopiques permettent de simuler les changements de phase de manière plus précise et tiennent compte de la diminution de la porosité, ils nécessitent au préalable de nombreux test sur des échantillons pour obtenir des paramètres valides du modèle. Ces tests sont souvent longs et onéreux.

##### a) Modèle Stadium

Le modèle Stadium est développé pour les bétons à l'état non saturé soumis aux actions combinées des chlorures et des sulfates [Marchand98]. Le modèle est divisé en quatre parties traitant respectivement du transport d'ions par diffusion, du transport de l'eau, des réactions chimiques et de l'endommagement chimique [Marchand01a]. La méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre les équations de transport des différents ions [Samson99] [Samson99a], et ainsi déduire leur concentration dans le béton d'enrobage. Sept ions différents sont traités soit le  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et le  $\text{Mg}^{2+}$  [Samson99c] [Samson02] [Samson03] [Maltais03]. Prochainement, la carbonatation sera incluse dans le modèle Stadium avec le transport du gaz carbonique ou le traitement de l'ion  $\text{HCO}_3^-$  [Marchand03]. Le mouvement de chaque ion est décrit à travers la loi suivante (EQ. A.65) [Samson99b].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\text{H} \cdot c_i) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \text{H} \cdot D_i \cdot \frac{\partial c_i}{\partial x} + \text{H} \cdot \frac{D_i \cdot z_i \cdot F}{R \cdot T} \cdot c_i \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial x} + \text{H} \cdot D_i \cdot c_i \cdot \frac{\partial}{\partial x} \ln \gamma_i - (c_i \cdot v) \right) \quad (\text{EQ. A.65})$$

$c_i$	[kg/m <sup>3</sup> solution] concentration de l'ion i dans une phase aqueuse,
H	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> béton] teneur en eau,
$D_i$	[m <sup>2</sup> /s] coefficient de diffusion,
$z_i$	nombre de valence de l'ion i,
F	[C/mol] constante de Faraday (9.6485.10 <sup>4</sup> ),
t	[s] temps,
x	[m] distance,
R	[J/mol.°C] constante des gaz (8.314510),
T	[K] température absolue du système,
$\Psi$	potentiel de diffusion,
$\gamma_i$	coefficient d'activité chimique,
v	[m/s] vitesse du liquide.

Le transport de vapeur d'eau et la succion capillaire sont pris en considération par modification du coefficient de diffusion [Marchand02a]. Le coefficient de diffusion est modélisé par une loi exponentielle en fonction de l'humidité relative du béton (EQ. A.66) [Hazrati98] [Samson04].

$$v = -D_w \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \quad (EQ A.66)$$

$D_w$  [m<sup>2</sup>/s] coefficient de diffusion de la teneur en eau dans le béton.

La formation de neuf phases solides est également prise en considération en tenant compte de l'équilibre chimique comme la portlandite carbonatée [Ca(OH)<sub>2</sub>], le calcium hydraté [3CaO.2SiO<sub>2</sub>.3H<sub>2</sub>O], le gypse [CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O], le sel de Friedel [3CaO.CaCl<sub>2</sub>.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.10H<sub>2</sub>O], la brucite [Mg(OH)<sub>2</sub>], la mirabilite [Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.10H<sub>2</sub>O], la halite [NaCl], l'ettringite [3CaO.3CaSO<sub>4</sub>.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.32H<sub>2</sub>O], le monosulfoaluminate [3CaO.3CaSO<sub>4</sub>.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.12H<sub>2</sub>O] et la syngénite [K<sub>2</sub>Ca(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O] [Marchand00] [Marchand02b] [Marchand02c] [Samson00].

### b) Modèle Ms Diff (Multi-Species Diffusion)

Le modèle de Ms Diff, résolu par la méthode des différences finies, prend en compte le mouvement de différents ions Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> et OH<sup>-</sup> dans le béton. La composition des pores, la prise en compte d'un liquide réel, la capacité d'adsorption des ions chlorures sont incluses dans le modèle Ms Diff sous l'influence d'un champ électrique. Pour chaque ion, l'équation de mouvement peut être établie (EQ. A.67) [Truc00] [Truc00a].

$$J_i(x, t) = -D_{ei} \cdot \left( \frac{\partial}{\partial x} c_i(x, t) + \frac{F}{R \cdot T} \cdot z_i \cdot c_i(x, t) \cdot E(x, t) + \frac{c_i(x, t)}{\gamma_i(x, t)} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \gamma_i(x, t) \right) \quad (EQ A.67)$$

$J_i$  [mol/m<sup>2</sup>s] flux du ion i,

$D_{ei}$  [m<sup>2</sup>/s] coefficient de diffusion effectif,

$E$  [V/m] champ électrique.

### c) Modèle de Masi

Le modèle de Masi, développé avec la méthode des différences finies, prend en considération des mouvements ioniques des Cl<sup>-</sup> et OH<sup>-</sup> sous un champ électrique (EQ. A.68) [Masi97].

$$H \cdot \frac{\partial c_i}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left( \sum_{m=1}^{N_c-1} D_{i,m} \cdot \frac{\partial c_i}{\partial x} - \left( u_i \cdot F \cdot c_i \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right) - \left( \rho_s \cdot \frac{\partial \Gamma_i}{\partial t} \right) \quad (EQ A.68)$$

$D_{i,m}$  [m<sup>2</sup>/s] coefficient de diffusion effectif,

$u_k$  mobilité effective,

$\phi$  valeur local du potentiel électrique,

$\Gamma_i$  quantité adsorbée par réaction chimique.

### d) Modèle de Shin

Le modèle de Shin utilise la méthode des éléments finis pour la résolution des équations différentielles. Le modèle de Shin simule le mouvement des ions chlorures par diffusion dans la phase aqueuse et la réaction chimique des ions chlorures avec sa phase solide [Shin01].

### e) Modèle de Schmidt-Döhl

Le modèle de Schmidt-Döhl, basé sur la méthode des différences finies, prend en considération les transports de vapeur d'eau et d'eau liquide aussi que les différentes réactions chimiques du béton avec



les sulfates et les chlorures. La succion capillaire est prise en considération en fonction de la température et de la teneur en eau. Cependant, elle influence le transport ionique seulement dans le taux de remplissage des pores capillaires [SchmidtDohl99] [SchmidtDohl99a].

#### f) Modèle de Roelfstra

Le modèle de Roelfstra est le prédécesseur du modèle TransChlor, développé dans le cadre de ce travail (§ 3.1). C'est un modèle à échelle macroscopique. Le mouvement des ions chlorures est pris en considération par entraînement des ions chlorures par l'eau et par diffusion des ions chlorures dans l'eau (EQ. A.70). La présence d'ions chlorures dans l'eau de précipitations est une valeur moyenne annuelle calculée pour la région de Pully (VD - Suisse). Durant la simulation, les conditions de bord utilisent cette valeur constante pour la concentration en ions chlorures et utilisent les données météorologiques de la station de Pully. Ces données météorologiques se limitent aux précipitations et l'humidité relative [Roelfstra01].

Le mode de transport de l'eau sous forme de liquide et de vapeur d'eau ainsi que les ions chlorures utilisent la loi de diffusion de Fick (EQ. A.69). La résolution de cette équation différentielle est établie grâce à la méthode des éléments finis. La succion capillaire est prise en considération, ceci en augmentant la valeur du coefficient de capillarité et en la faisant varier en fonction de la profondeur (Figure A.53).

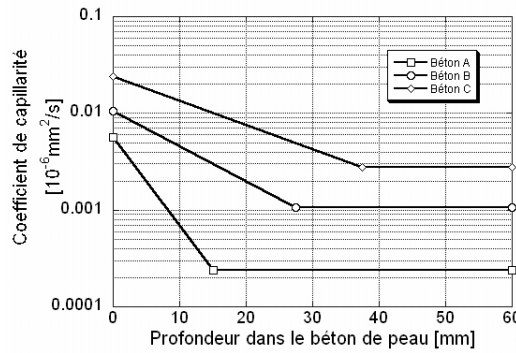


FIGURE A.53: Coefficient de capillarité du modèle de Roelfstra, variation avec la profondeur dans le béton d'enrobage pour trois recettes de béton de perméabilité différente, béton A faible perméabilité, béton B perméabilité moyenne et béton C forte perméabilité [Roelfstra00] [Roelfstra01].

Le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau varie, lui, en fonction du taux de remplissage des pores capillaires, suivant la loi de Bazant (§ 3.1.4). De plus le transport des ions chlorures prend en considération la quantité d'ions chlorures capturés par la pâte de ciment (EQ. A.71) (§ A.5.7.3) [Roelfstra00].

$$\frac{\partial H}{\partial t} = D_h \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \quad (EQ. A.69)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_h \cdot R \cdot c_f \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + D_{Cl} \cdot w \cdot \frac{\partial^2 c_f}{\partial x^2} \quad (EQ. A.70)$$

$$C = C_F + C_B = w \cdot c_f + (1 - w_{sat}) \cdot c_b = w \cdot c_f + (1 - w_{sat}) \cdot \gamma \cdot c_f \quad (EQ. A.71)$$

H [-] humidité relative dans les pores du béton,

t [s] temps,

x	[mm] distance dans le béton d'enrobage,
$D_h$	[mm <sup>2</sup> /s] coefficient de diffusion de la vapeur d'eau,
$D_{Cl}$	[mm <sup>2</sup> /s] coefficient de diffusion des ions chlorures dans l'eau,
C	[kg/m <sup>3</sup> ] concentration en ions chlorures totaux rapportée au volume du béton,
$C_F$	[kg/m <sup>3</sup> ] concentration en ions chlorures libres dans les interstices du béton rapportée au volume du béton,
$C_B$	[kg/m <sup>3</sup> ] concentration en ions chlorures capturés par la pâte de ciment rapportée au volume du béton,
$c_f$	[kg/m <sup>3</sup> ] concentration en ions chlorures libres dans les interstices du béton rapportée au volume de la solution,
$c_b$	[kg/m <sup>3</sup> ] concentration en ions chlorures capturés par la pâte de ciment rapportée au volume de la solution,
w	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ] teneur en eau rapportée au volume du béton,
$w_{sat}$	[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ] teneur en eau à l'état saturé rapportée au volume du béton,
$\gamma$	facteur reliant la concentration d'ions chlorures liées aux ions chlorures libres, constante valant 0.6.

#### g) Modèle ClincConc

Le modèle ClincConc utilise la méthode des différences finies afin de prendre en considération le mouvement des ions chlorures dans le béton d'enrobage. Le transport des ions chlorures tient compte seulement des ions chlorures libres et ceci uniquement à la fin d'un pas de temps. Mais seule, la concentration en ions chlorures totaux est calculée (EQ. A.72) [Tang96].

$$\Delta c_{i,j} = \epsilon_c \cdot D_{i,j} \cdot \frac{c_{i-1,j-1} - (2 \cdot c_{i,j-1}) + c_{i+1,j-1}}{\Delta x^2} \cdot \Delta t_j \quad (EQ. A.72)$$

i	indice de position de la profondeur dans le béton d'enrobage,
j	indice de position dans le temps,
$\Delta c$	[kg/m <sup>3</sup> ] concentration en ions chlorures libres supplémentaire durant un intervalle de temps $\Delta t$ rapportée au béton,
c	[kg/m <sup>3</sup> ] concentration en ions chlorures libres rapportée au béton,
$\epsilon_c$	[-] porosité du béton,
D	[m <sup>2</sup> /s] coefficient de diffusion des ions chlorures dans l'eau,
$\Delta x$	[m] portion d'espace discrétisée par la méthode des différences finies,
$\Delta t$	[s] portion de temps discrétisée par la méthode des différences finies.

Le coefficient de diffusion (EQ. A.73) prend en considération le béton d'enrobage (§ A.4.3, EQ. A.74 et EQ. A.75), l'âge du béton (EQ. A.76 et EQ. A.77) [Tang96] [Stanish02] [Lay03] et la température avec la loi d'Arrhénius (EQ. A.78) [Tang96] [Amey98] [Lay03] [Hansen97].

$$D_{i,j} = D_{0,To} \cdot f_D(T_j) \cdot g(t_j) \cdot f(x_i) \quad (EQ. A.73)$$

$$f(x_i) = \varphi + (1 - \varphi) \cdot \left(\frac{x_i}{x_s}\right)^\beta \quad \text{si } x_i < x_s \quad (EQ. A.74)$$

$$f(x_i) = 1 \quad \text{si} \quad x_i \geq x_s \quad (EQ A.75)$$

$$g(t_j) = \left(\frac{t_D}{t_j}\right)^\gamma \quad \text{si} \quad t_j < t_D \quad (EQ A.76)$$

$$g(t_j) = 1 \quad \text{si} \quad t_j \geq t_D \quad (EQ A.77)$$

$$f_D(T_j) = e^{-\frac{E_D}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_j} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (EQ A.78)$$

$D_{o,T_0}$  [m<sup>2</sup>/s] coefficient de diffusion intrinsèque des ions chlorures, déterminé par l'essai rapide CTH [Tang96],

$f_D(T_j)$  facteur prenant en compte l'effet de température avec la loi d'Arrhénius,

$g(t_j)$  facteur prenant en compte l'effet de l'âge du béton,

$f(x_i)$  facteur prenant en compte l'effet de la profondeur dans le béton d'enrobage,

$\phi$  rapport entre le coefficient de diffusion dans le béton d'enrobage et le coeur du béton,

$x_i$  [m] distance dans le béton d'enrobage,

$x_s$  [m] épaisseur de le béton d'enrobage,

$\beta$  exposant constant pour la prise en compte de l'effet de le béton d'enrobage,

$\gamma$  exposant constant pour la prise en compte de l'effet de l'âge du béton,

$t_j$  [s] âge du béton au moment j,

$t_D$  [s] âge du béton lorsque le coefficient de diffusion devient constant,

$E_D$  [J/mol] énergie d'activation du modèle d'Arrhénius,

$R$  [J/mol.°C] constante des gaz (8.314510),

$T_j$  [K] température absolue au moment j,

$T_0$  [K] température absolue de référence du modèle d'Arrhénius.

La concentration d'ions chlorures libres (EQ. A.79) s'additionne aux ions chlorures obtenus lors de la dernière itération (EQ. A.72) [Tang96].

$$Q_{i,j,T} = Q_{i,j-1,T} + \Delta c_{i,j} \quad (EQ A.79)$$

$Q_{i,j,T}$  [kg/m<sup>3</sup>] concentration en ions chlorures totaux rapportée au volume du béton.

La concentration des ions chlorures totaux est l'addition des ions chlorures libres et des ions chlorures capturés par la pâte de ciment. La concentration en ions chlorures libres, disponible pour la simulation suivante, peut être obtenue avec l'équation suivante (EQ. A.80). La teneur en eau apparaît dans

cette équation et elle est calculée par une loi de diffusion de Fick prenant en compte le transport de la vapeur d'eau [Lindvall00].

$$Q_{i,j,T} = Q_{i,j,B} + c_{i,j} \cdot w_{i,j} \quad (EQ A.80)$$

$Q_{i,j,B}$  [kg/m<sup>3</sup>] concentration en ions chlorures capturés par la pâte de ciment rapportée au volume du béton,

$w_{i,j}$  [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>] teneur en eau rapportée au volume du béton.

L'isotherme de Freundlich (§ A.5.7.3) est utilisé pour prendre en considération la capture par la pâte de ciment des ions chlorures (EQ. A.81) [Tang96].

$$Q_{i,j,B} = A \cdot c_{i,j}^\beta \quad (EQ A.81)$$

A paramètre de l'isotherme de Freundlich,

$\beta$  exposant et paramètre de l'isotherme de Freundlich.

#### h) Modèle de Meijers

Le modèle de Meijers utilise la méthode des éléments finis pour résoudre trois modes de transport couplés entre eux, soit la diffusion thermique, le transfert hydrique et le transfert ionique des chlorures (EQ. A.82) [Meijers03].

$$\begin{bmatrix} c_{11} & 0 & 0 \\ c_{21} & 1 & 0 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial T}{\partial t} \\ \frac{\partial H}{\partial t} \\ \frac{\partial C}{\partial t} \end{bmatrix} = \text{div} \left( \begin{bmatrix} k_{11} & 0 & 0 \\ 0 & k_{22} & 0 \\ 0 & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overrightarrow{\text{grad}T} \\ \overrightarrow{\text{grad}H} \\ \overrightarrow{\text{grad}C} \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (EQ A.82)$$

$c_{11}$  [kJ/(m<sup>3</sup>.K)] capacité calorifique rapporté au volume du béton,

$k_{11}$  [W/(m.K)] conductivité thermique du béton,

$c_{21}$  [K<sup>-1</sup>] paramètre du transport d'eau du au transfert thermique,

$k_{22}$  [m<sup>2</sup>/s] coefficient de diffusion de l'eau liquide ou sous forme de vapeur,

$c_{31}$  capacité d'emmagasinement des ions chlorures en fonction de la température,

$c_{32}$  capacité d'emmagasinement des ions chlorures en fonction de l'humidité relative,

$c_{33}$  capacité d'emmagasinement des ions chlorures en fonction de la concentration en ions chlorures libres,

$k_{32}$  coefficient prenant en considération l'entraînement des ions chlorures par l'eau,

$k_{33}$  [m<sup>2</sup>/s] coefficient de diffusion des ions chlorures dans l'eau,

$f_3$  source interne de formation d'ions chlorures,

T [°C] température,

H [-] humidité relative dans les pores du béton,

C [kg/m<sup>3</sup>] concentration en ions chlorures rapportée au volume de béton.

A partir de cette forme générale de l'équation, la diffusion thermique est totalement déconnectée des autres modes de transport, comme dans le modèle TransChlor (§ 3.1.1). La diffusion thermique est un processus très rapide par rapport aux autres modes de transport et cette séparation est une simplification raisonnable. Le coefficient de diffusion de l'eau prend en considération le taux de remplissage des pores capillaires grâce à la loi de Bazant (§ 3.1.4). Un facteur supplémentaire s'ajoute à ce coefficient de diffusion lorsque le béton est carbonaté [Meijers02b].

Les isothermes d'adsorption et de désorption sont prises en considération en tenant compte du degré d'hydratation du béton, du rapport massique de l'eau sur le ciment. Le paramètre  $c_{21}$  (dans la partie de l'équation de transport de l'eau) prend en considération les variations de la teneur en eau dans le béton dues à la température et aux isothermes d'adsorption et de désorption. Dans la partie de l'équation de transport des ions chlorures, les ions chlorures totaux sont pris en considération avec l'isotherme de Langmuir (§ A.5.7.3, EQ. A.83 et EQ. A.84) [Meijers02].

$$C_T = \frac{w}{\rho_w} \cdot c_f + c_h \cdot c_b \quad (EQ A.83)$$

$$c_b = \frac{c_f}{\xi_2 + \xi_1 \cdot c_f} \quad (EQ A.84)$$

$C_T$  [kg/m<sup>3</sup>] concentration en ions chlorures totaux rapportée au volume du béton,

$c_f$  [kg/m<sup>3</sup>] concentration en ions chlorures libres dans les interstices du béton rapportée au volume de la solution,

$c_b$  [kg/m<sup>3</sup>] concentration en ions chlorures capturés par la pâte de ciment rapportée au volume de la solution,

$c_h$  [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>] quantité de ciment hydraté rapportée au volume de béton,

$w$  [kg/m<sup>3</sup> béton] teneur en eau du béton,

$\rho_w$  [kg/m<sup>3</sup>] masse volumique de l'eau,

$\xi_1$  paramètre de l'isotherme de Langmuir,

$\xi_2$  paramètre de l'isotherme de Langmuir.

Le coefficient de diffusion des ions chlorures prend en considération la teneur en eau dans les pores du béton et la température selon la loi d'Arrhénius (EQ. A.85) [Meijers01].

$$k_{33} = \kappa \cdot \frac{w(T, H)}{w_{\text{sat}}(T)} \cdot e^{\frac{\lambda}{R} \cdot \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)} \quad (EQ A.85)$$

$\kappa$  [m<sup>2</sup>/s] conductivité des ions chlorures à l'état de saturation,

$w_{\text{sat}}$  [kg/m<sup>3</sup>] teneur en eau à l'état de saturation rapportée au volume du béton,

$\lambda$  [J/mol] énergie d'activation du modèle d'Arrhénius,

$T$  [K] température absolue,

$T_0$  [K] température absolue de référence du modèle d'Arrhénius.

Le paramètre  $k_{32}$  prend en considération l'entraînement des ions chlorures par l'eau. Le mouvement d'eau est formulé pour la vapeur d'eau seule (EQ. A.86) [Meijers01].

$$k_{32}(T, H, c_f) = \frac{c_f}{\rho_w} \cdot \frac{\partial w}{\partial H} \cdot k_{22} \quad (EQ A.86)$$

Les paramètres  $c_{31}$ ,  $c_{32}$  et  $c_{33}$  considèrent la capacité d'emmagasinement des ions chlorures en fonction respectivement de la température, de l'humidité relative et de la concentration en ions chlorures libres [Meijers01].

### i) Modèle de Saelta

Le modèle de Saelta utilise la méthode des différences finies pour prédire le mouvement des ions chlorures dans le béton d'enrobage (EQ. A.87) [Saelta93] [Puatatsananon02] [Ababneh02a] [Taheri98] [Lindvall01].

$$\frac{\partial c_f}{\partial t} = \frac{\partial c_f}{\partial c_t} \cdot \left( \text{div}[D_{Cl} \cdot \overrightarrow{\text{grad}c_f}] + \mu \cdot \frac{\partial w}{\partial H} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \cdot c_f \right) \quad (EQ A.87)$$

$H$  [-] humidité relative dans les pores du béton,

$t$  [s] temps,

$D_{Cl}$  [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ] coefficient de diffusion des ions chlorures dans l'eau,

$c_f$  [g/g] concentration en ions chlorures libres dans les interstices du béton rapportée au béton,

$c_t$  [g/g] concentration en ions chlorures capturés par la pâte de ciment rapportée au béton,

$\mu$  [l/g] paramètre de conversion d'unité en gramme d'ions chlorures par gramme de béton,

$\partial c_f / \partial c_t$  capacité d'adsorption des ions chlorures par la pâte de ciment,

$\partial w / \partial H$  capacité d'adsorption de la vapeur d'eau dans les pores du béton,

$\partial H / \partial t$  variation temporelle de l'humidité relative dans les pores du béton.

La prise en compte de la capacité d'adsorption des ions chlorures par la pâte de ciment est effectuée, à choix, sur la base de l'isotherme de Freundlich ou de l'isotherme de Langmuir (§ A.5.7.3). Le coefficient de diffusion des ions chlorures (EQ. A.88) prend en considération la teneur en agrégats (EQ. A.89), la composition du béton (EQ. A.90), le temps de cure du béton (EQ. A.90), la température avec la loi d'Arrhénius, l'humidité relative dans les pores du béton selon le modèle de Bazant (EQ. A.91) [Lay03] et de la concentration en ions chlorures déjà présente dans les pores (EQ. A.92) [Saelta93] [Puatatsananon02] [Ababneh02a] [Taheri98] [Lindvall01].

$$D_{Cl} = f_1(g_i) \cdot f_2\left(\frac{E}{C}, t_0\right) \cdot f_3(T) \cdot f_4(H) \cdot f_5(c_f) \quad (EQ A.88)$$

$$f_1(g_i) = D_m \cdot \left( 1 + \frac{g_i}{\frac{1-g_i}{3} + \frac{D_m}{D_i - D_m}} \right) \quad (EQ A.89)$$

$$f_2\left(\frac{E}{C}, t_0\right) = \left[ \frac{1}{4} + \frac{(28 - t_0)}{300} \right] \cdot \left( \frac{E}{C} \right)^{6.55} + \frac{28 - t_0}{62.5} \quad (EQ A.90)$$

$$f_4(H) = \left[ 1 + \left( \frac{1-H}{1-H_c} \right)^4 \right]^{-1} \quad (EQ A.91)$$

$$f_5(c_f) = 1 - (k_{ion} \cdot c_f^m) \quad (EQ A.92)$$

- $f_1$  [mm<sup>2</sup>/s] facteur tenant compte de la teneur en granulats,  
 $f_2$  facteur tenant compte du rapport massique de l'eau sur le ciment et du temps de cure du béton,  
 $f_3$  facteur tenant compte de la température avec la loi d'Arrhénius,  
 $f_4$  facteur tenant compte de l'humidité relative avec la loi de Bazant,  
 $f_5$  facteur tenant compte de la concentration en ions chlorures,  
 $g_i$  fraction du volume des agrégats par rapport au volume du béton,  
 $D_i$  [mm<sup>2</sup>/s] coefficient de diffusion des ions chlorures dans les agrégats,  
 $D_m$  [mm<sup>2</sup>/s] coefficient de diffusion des ions chlorures dans la matrice du ciment,  
 $t_0$  [jours] temps de cure du béton,  
 $E/C$  [-] rapport massique de l'eau sur le ciment,  
 $H_c$  coefficient du modèle de Bazant,  
 $k_{ion}$  paramètre ayant pour valeur 70<sup>0.5</sup>,  
 $m$  exposant ayant pour valeur 1/2.

#### j) Modèle d'Ishida

Le modèle d'Ishida est un modèle développé à la base pour simuler la carbonatation dans le béton d'enrobage. Dans un deuxième temps, le mouvement des ions chlorures dans le béton a été incorporé dans ce modèle (EQ. A.93). La méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre les équations différentielles [Ishida00a] [Maekawa00].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \cdot S \cdot c_{Cl}) + \text{div} \left[ \frac{\varepsilon \cdot S}{\Omega} \cdot D_{Cl} \cdot \overrightarrow{\text{grad} c_{Cl}} + \varepsilon \cdot S \cdot \vec{u} \cdot c_{Cl} \right] = 0 \quad (EQ A.93)$$

- $D_{Cl}$  [mm<sup>2</sup>/s] coefficient de diffusion des ions chlorures dans l'eau,  
 $\varepsilon$  [-] volume des pores sur le volume total du béton,  
 $S$  degré de saturation des pores capillaires,  
 $c_{Cl}$  [mol/l] concentration en ions chlorures dans la phase liquide,  
 $\Omega$  facteur de tortuosité, valant  $(\pi/2)^2$ ,  
 $u$  [m/s] vecteur simulant la vitesse de l'eau dans les pores du béton,

La capacité de la pâte de ciment à capturer les ions chlorures est pris en considération par le modèle de Maruya (EQ. A.94 à EQ. A.98) [Maekawa00].

$$\alpha = \frac{c_b}{c_b + c_{Cl}} = \frac{c_b}{c_t} \quad (EQ A.94)$$

$$\alpha = 1 \quad \text{si} \quad c_t \leq 0.1 \quad (EQ A.95)$$

$$\alpha = 1 - [0.35 \cdot (c_t - 0.1)] \quad \text{si} \quad 0.1 \leq c_t \leq 3 \quad (EQ A.96)$$

$$\alpha = 0.543 \quad \text{si} \quad c_t > 3 \quad (EQ A.97)$$

$$c_t = c_b + c_{Cl} \quad (EQ A.98)$$

$c_b$  [mol/l] concentration en ions chlorures liées à la pâte de ciment rapportée à la phase liquide,

$c_t$  [mol/l] concentration en ions chlorures totale rapportée à la phase liquide,

$\alpha$  paramètre de l'isotherme de l'adsorption des ions chlorures par la pâte de ciment du modèle de Maruya.

Le mouvement de l'eau est pris en considération avec l'équation de la diffusion de la vapeur d'eau selon la loi de Fick [Maekawa02] [Ishida00].

## A.6 Développement de la corrosion

La période sans développement de la corrosion est la période d'incubation, soit durant laquelle les ions chlorures et la carbonatation évoluent dans le béton d'enrobage. Dès que la corrosion s'initie, on se trouve dans la période de propagation (Figure A.54 a), c'est durant cette phase que la section de l'armature diminue. La vitesse de diminution de la section dépend de l'exposition de l'ouvrage aux intempéries et aux attaques chimiques (Figure A.54 b) [Schiegg02]. L'instant précis, où la corrosion démarre, est appelé initiation de la corrosion [Conciatori02] [Denarie03] [Stewart98a].

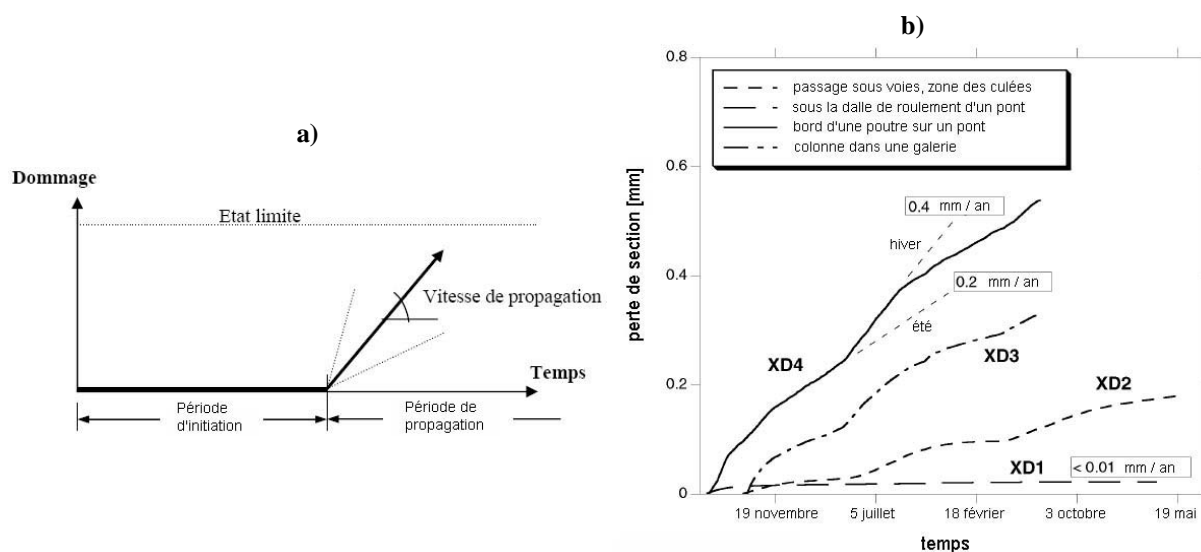


FIGURE A.54: Diagramme de Tuutti représentant les phases de corrosion de l'armature en présence de chlorures a) Diagramme de Tuutti usuel [Roelfstra01], b) Représentation d'un monitoring d'un pont sous forme de diagramme de Tuutti [Schiegg02] [Schiegg02a].



### A.6.1 Types d'acier de construction

Le chrome est un élément essentiel de la passivation des aciers. Une teneur en chrome supérieure à 12 et 13% forme les aciers dit inoxydable. Par contre, le soufre facilite la germination de la corrosion par piqûres. Les revêtements métalliques sont couramment employés pour protéger l'acier, ils sont le plus souvent à base de zinc, mais on en trouve également à base d'alliage de nickel et de plomb. Des revêtements inorganiques non métalliques sont également utilisés, tels les revêtements à base de résine d'époxy. La difficulté pour ces derniers réside dans leur mise en oeuvre sans les abîmer lors du stockage et de la mise en place des barres. Tout défaut équivaut à un emplacement préférentiel pour le début de la corrosion [Audergon00]. Un autre acier inoxydable, l'acier inoxydable (1.4003), possède des propriétés intermédiaires entre les aciers inoxydables et les aciers usuels pour la résistance aux ions chlorures. Cet acier a été développé avec une teneur en chrome élevée [Schiegg04] [Bruehwiler01] [Bruehwiler03] [VonMoos02].

### A.6.2 Initiation de la corrosion

La corrosion s'entame dès que trois conditions sont réunies, la couche de passivation est éliminée, la teneur en oxygène est élevée et la présence de l'électrolyte ou de l'eau est suffisante (Figure A.55). La présence d'ions chlorures et/ou la carbonatation élimine le film passif en abaissant le pH du béton à proximité immédiate de l'acier d'armature [Glass00] [Reddy02].

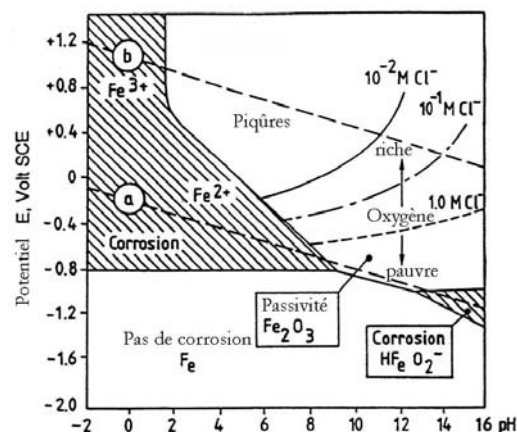


FIGURE A.55: Diagramme mettant en relation le potentiel et le pH dans une solution aqueuse [Lindvall01].

Lorsqu'un métal est plongé dans l'eau, le métal a tendance à évoluer vers sa forme oxydée, alors que la réaction cathodique consomme les électrons créés par l'oxydation. Dans certains cas, les oxydes ou hydroxydes formés à l'interface du métal et de la solution sont suffisamment bien organisés pour constituer un film protecteur vis-à-vis de la dissolution anodique. Ceci grâce à la résistance que ce dernier offre au passage des cations. Si cette résistance est suffisamment grande, le transfert de cations depuis le métal vers la solution est ralenti et la vitesse de dissolution anodique devient très faible. Ces films sont généralement très minces, de l'ordre de 1 à 3 nanomètres [Audergon00].

Dès que la corrosion s'initie, l'acier perd les électrons dans la zone anodique (EQ. A.99) [Nuernberger01] [Petre00] [Lindvall01] [Elsener96].



Dans la zone cathodique, la réaction principale est décrite ci-après (EQ. A.100) [Castelotte00].



La réaction combinée de l'anode et de la cathode forme l'hydroxyde de fer (Figure A.56 et EQ. A.101) [Hansen97] [Roelfstra00] [Roelfstra01] [Petre00] [Elsener96].

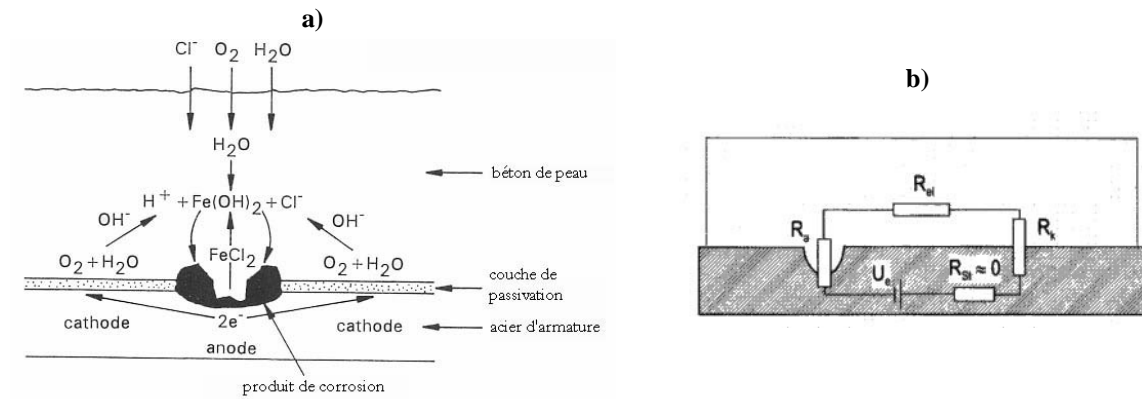


FIGURE A.56: Schéma de corrosion par piqûre a) corrosion de l'acier [Kropp95], b) courant de corrosion, schéma électrique [Schiegg02].

Un courant de corrosion est créé qui peut être facilement mesurable (EQ. A.102 et Figure A.56 b) [Schiegg02].

$$I_{\text{corr}} = \frac{\Delta u}{R_A + R_k + R_B} \quad (\text{EQ A.102})$$

- $I_{\text{corr}}$  [A] courant de corrosion,  
 $\Delta u$  [V] différence de potentiel électrique,  
 $R_A$  [ $\Omega$ ] résistance due à la réaction dans la partie de l'anode,  
 $R_k$  [ $\Omega$ ] résistance due à la réaction dans la partie de la cathode,  
 $R_B$  [ $\Omega$ ] résistance électrique du béton.

Si le fer n'était que dissout dans l'eau interstitielle du béton, les fissures et les éclatements ne seraient pas visibles. Plusieurs étapes doivent se succéder pour former des produits expansifs. L'ordre de grandeur de l'expansion est d'environ un sur trois [Laferriere05] [Lindvall01]. Dès la formation de l'hydroxyde de fer, les phases successives de transformation sont l'hydroxyde ferrique et l'oxyde ferrique hydraté ou rouille (Figure A.57). La formule chimique des deux derniers est donnée ci-après dans leur ordre respectif (Figure A.57, EQ. A.103 et EQ. A.104) [Laferriere05] [Lindvall01].

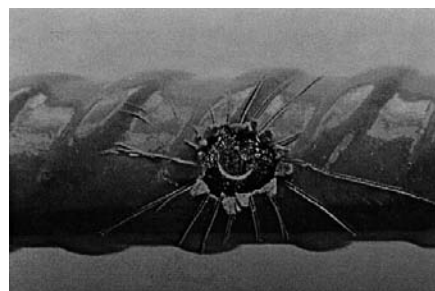


FIGURE A.57: Photo d'une corrosion par piqûre [Darwin02].

La corrosion par baisse du pH due à la présence des ions chlorures est explicitée avec la réaction chimique ci-après (EQ. A.104) [Audergon00].



La teneur critique en ions chlorures est encore actuellement un sujet d'étude et comprend une grande variabilité selon les auteurs. Une approche probabiliste permet de prendre en considération cette variabilité de manière plus efficace (§ 4.3).

Chlorures totaux [%] masse ciment	Chlorures libres [mol/l]	[Cl]/[OH] [-]	Remarques	Références
0.17 - 1.4			structure	[Stratful75]
0.2 - 1.5			structure	[Vassie84]
0.5 - 0.7			béton à l'extérieur	[Thomas90]
0.25 - 0.5			mortier en laboratoire	[Elsener86]
0.3 - 0.7			structure	[Henriksen93]
0.32 - 1.9			béton à l'extérieur	[Treadaway89]
0.4			béton à l'extérieur	[Bamforth94]
0.4 - 1.6			mortier en laboratoire	[Hansson90]
0.5 - 1.4			béton en laboratoire	[Tuutti93]
0.6			béton en laboratoire	[Locke80]
1.6 - 2.5	0.4 - 1.4	3 - 20	béton en laboratoire	[Lambert91]
1.8 - 2.2			structure	[Lukas85]
		0.26 - 0.8	en laboratoire	[Goni90]
		0.3	pâte de ciment en laboratoire	[Diamond86]
		0.6	en laboratoire	[Hausmann67]
		1 - 40	mortier en laboratoire	[Yonezawa88]
	0.05 - 0.25			[Byfors87]
	0.44		E / C = 0.75	[Elsener50]
1			structure	[Hartl84] [Hartl88]
0.2 - 0.4			E / C = 0.45	[Hope87]
0.3 - 1				[Hussain95] [Rasheeduzzafar91] [Rasheeduzzafar92]
0.4 - 1.0	> 0.1	> 0.3	ciment résistant aux sulfates	[Page91]
	< 0.6		ciment portland / cendres volantes / fumée de silice	[Mangat91] [Mangat95]
		320	béton de fibre	[Mangat88]
0.4 - 1			variation de la quantité de fumée de silice	[Page85]
0.61 - 1.39	0.13 - 0.62		dalle de béton	[Pettersson93] [Pettersson95]
0.6 - 1.8	0.44 - 3.21	0.9 - 1.7 2.5 - 6	ciment portland cendres volantes / fumée de silice	[Pettersson90] [Pettersson93] [Pettersson95]
0.18 - 0.26			E / C = 0.28 - 0.51	[Pfeifer86] [Pfeifer86a]
0.5 - 1			E / C = 0.5 - 0.7	[Raupach93]
0.4				[Richartz69]
0.2 - 2.1			E / C = 0.3 - 0.75	[Sandberg95]

TABLEAU A.8: Taux critiques de concentration en ions chlorures au niveau des aciers d'armature, selon [Breit98] [Glass97]

Chlorures totaux [%] masse ciment	Chlorures libres [mol/l]	[Cl]/[OH] [-]	Remarques	Références
0.5 - 1 1 - 1.5			ciment portland ajout de fumée de silice	[Schiessl94] [Schiessl96]
0.5 - 2.2			E / C = 0.5 - 0.7	[Schiessl94a] [Schiessl95]
> 0.5				[Schiessl88a] [Schiessl90] [Schiessl91a]
> 0.5				[Schiessl86]
0.6 - 1				[Smolczyk84]
	0.15% masse ciment			[Stark84]
0.2 - 0.4				[Stratfull75]
0.7 / 0.65 0.5 / 0.2			ciment portland / 15% fumée de silice 30% fumée de silice / 50% fumée de silice	[Thomas96]
0.25			structure	[West85]
0.22 - 1.05			ciment portland, ajout de cendres volantes	[Wiens98]

TABLEAU A.8: Taux critiques de concentration en ions chlorures au niveau des aciers d'armature, selon [Breit98] [Glass97]

### A.6.3 Perte de section par corrosion

Lorsque la corrosion s'initie, le processus de corrosion s'entretient de lui-même. La dissolution du fer entraîne une perte de section de l'armature (Figure A.58) [Mangat95].

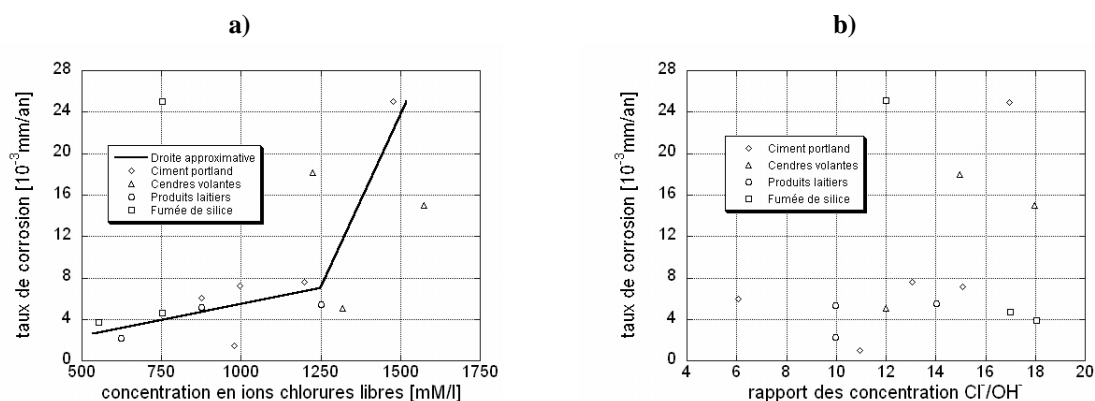


FIGURE A.58: Développement de la corrosion [Mangat95] en fonction a) de la concentration en ions chlorures libres, b) du rapport de la concentration en ions chlorures libres et du  $p_H$ .

Les rythmes saisonniers et le type d'exposition (Figure A.54 b) jouent également un rôle important pour la perte de section (Tableau A.9) [Schiegg04]. En effet, pendant la période estivale, la perte de section, est environ deux fois moins rapides par rapport à la période hivernale, car la période estivale est

plus sèche. Par contre, un facteur de 1 à 20 caractérise la perte de section en fonction des conditions d'exposition.

Exposition	Période estivale	Période hivernale
<b>XD1 au brouillard salin</b>	<b>&lt; 0.01 mm/an</b>	<b>&lt; 0.01 mm/an</b>
<b>XD2 au brouillard salin avec de légères éclaboussures</b>	<b>0.03 mm/an</b>	<b>0.15 mm/an</b>
<b>XD3 aux éclaboussures</b>	<b>0.15 mm/an</b>	<b>0.25 mm/an</b>
<b>XD4 à l'eau stagnante</b>	<b>0.2 mm/an</b>	<b>0.4 mm/an</b>

TABLEAU A.9: Perte de section par corrosion mesurée en fonction de l'exposition, d'après [Schiegg04].

La prise en compte de la perte de section due à la corrosion se modélise à travers deux types de corrosion, la corrosion généralisée et la corrosion par piqûres (Figure A.59).

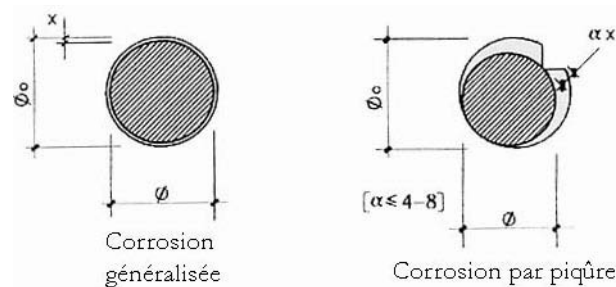


FIGURE A.59: Section résiduel, lors de la corrosion généralisée ou par piqûre [Rodriguez96].

Une possibilité de modélisation de ce phénomène peut s'effectuer sur la base des courants de corrosion dans l'armature (EQ. A.106 et EQ. A.107) [Rodriguez96] [Martinez01] [Bjegovic03] [Duracrete99].

$$x = 0.0115 \cdot I_{\text{corr}} \cdot t \quad (\text{EQ A.106})$$

$$\phi = \phi_0 - (\alpha \cdot x) \quad (\text{EQ A.107})$$

$I_{\text{corr}}$  [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ] courant de corrosion,

$t$  [an] temps,

$x$  [mm] pénétration de l'attaque par corrosion,

$\phi_0$  [mm] diamètre initiale de la barre d'armature,

$\phi$  [mm] diamètre résiduel après attaque par corrosion,

$\alpha$  coefficient dépendant du type d'attaque, pour une corrosion généralisée  $\alpha = 2$ , pour une attaque par piqûre  $\alpha < 4$  à 8.

La perte de section peut également être prise en considération avec la vitesse de corrosion (Figure A.54 b, Tableau A.9 et Tableau A.10) [Roelfstra00] [Roelfstra01].

$$\phi = \phi_0 - (2 \cdot v_{\text{corr}} \cdot x) \quad (\text{EQ A.108})$$

$v_{\text{corr}}$  [mm/an] vitesse de corrosion.

Exposition	Corrosion généralisée			Corrosion par piqûres		
	B	E	S	B	E	S
béton de faible perméabilité	0.004	0.02	0.02	0.02	0.1	0.1
béton de perméabilité moyenne	0.004	0.02	0.02	0.02	0.1	0.1
béton de grande perméabilité	0.02	0.08	0.08	0.1	0.4	0.4

TABLEAU A.10: Vitesse de corrosion en millimètres par an en fonction de la perméabilité du béton d'enrobage et de la classe d'exposition de l'ouvrage, B exposition au brouillard, E exposition aux éclaboussures, S exposition à l'eau stagnante [Roelfstra00] [Roelfstra01].

Le développement de la corrosion et de la fissuration fait également l'objet de modélisation. Par exemple, le modèle de Saouma prend en considération le changement de volume dû à la corrosion et les pressions dans le matériau [Saouma03].

#### A.6.4 Influence de la fissuration du béton

Dans un béton fissuré [Böhni91], la solution de chlore emprunte un chemin préférentiel au droit de la fissure, ce qui réduit le temps de la période d'incubation. Dès que la corrosion s'amorce, les produits de corrosion colmatent la fissure. Ainsi, la vitesse de corrosion est considérablement réduite au droit de la fissure, car la cathode ne peut plus consommer l'oxygène et l'électrolyte ou l'eau n'alimente plus le courant de corrosion. La cathode se déplace dans la partie saine du béton d'enrobage non fissurée où l'oxygène et l'électrolyte dépend des différents modes de transport standard développé dans le cadre de ce travail de recherche [Tuutti82]. Ainsi, l'amorçage de la corrosion se produit dès que le film passif est détruit et que la teneur en eau et en oxygène sont suffisantes au droit de l'acier d'armature (Figure A.60) [François99] [Konin98].

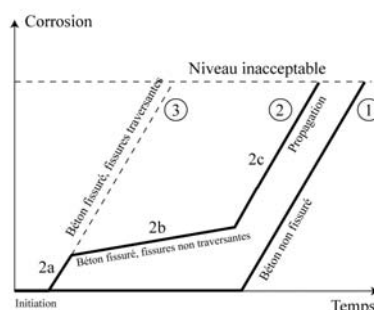


FIGURE A.60: Comparaison entre le processus de corrosion du béton armé fissuré et non fissuré [Brühwiler05].

La profondeur de la fissure et son ouverture sont également des paramètres importants. Lorsque le rapport entre l'ouverture et la profondeur de la fissure est inférieure à 0.01, il n'y a pas d'effet sur le coefficient de diffusion des ions chlorures [Gowripalan00].

Un état de corrosion avancé est également enregistré si l'ouverture des fissures dépasse une épaisseur de 0.2 à 0.5 millimètres. En-dessous de ces valeurs, les fissures se colmatent grâce aux produits de la corrosion [Brühwiler05] [Petre00].

Cependant, lorsque la fissuration d'un béton est dense, le coefficient de diffusion des ions chlorures peut être augmenté (EQ. A.109) (Figure A.61) [Gerard00].

$$\frac{D}{D_0} = \frac{D_1/D_0 + (f - 1)}{f} \quad (EQ A.109)$$

$f$  rapport entre l'espacement des fissures et leur ouverture,

$D_1$  [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ] coefficient de diffusion des ions chlorures dans la fissure,

$D_0$  [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ] coefficient de diffusion des ions chlorures dans le béton d'enrobage non fissuré,

$D$  [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ] coefficient de diffusion des ions chlorures moyen.

$$D = \frac{A_c \cdot D_1 + A_m \cdot D_0}{A_c + A_m} \quad (EQ A.110)$$

$A_c$  [ $\text{mm}^2$ ] surface dans la fissure,

$A_m$  [ $\text{mm}^2$ ] surface dans le béton sain.

Le coefficient de diffusion moyen peut également être établi avec le rapport des surfaces (EQ. A.110) [Gerard00].

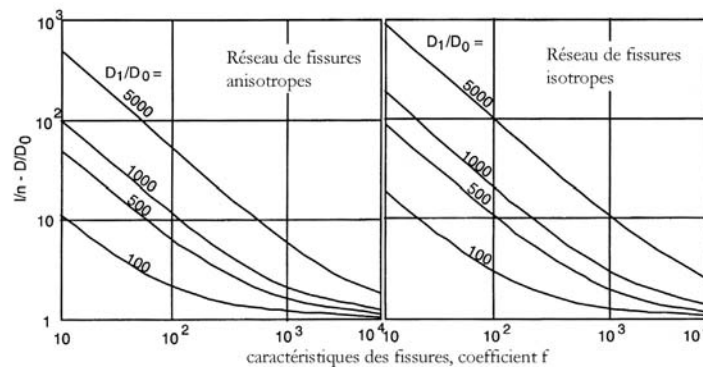


FIGURE A.61: Variation du coefficient de diffusion due à une fissuration dense en fonction des caractéristiques des fissures [Gerard00].





## Annexe B: Données météorologiques des stations ANETZ

Les cartes suisses, ci-après, proviennent du centre suisse de topographie. Les valeurs, ajoutées sur ces cartes, proviennent de l'institut suisse de météorologie [MétéoSuisse04], provenant des stations météorologiques ANETZ (Figure B.1).

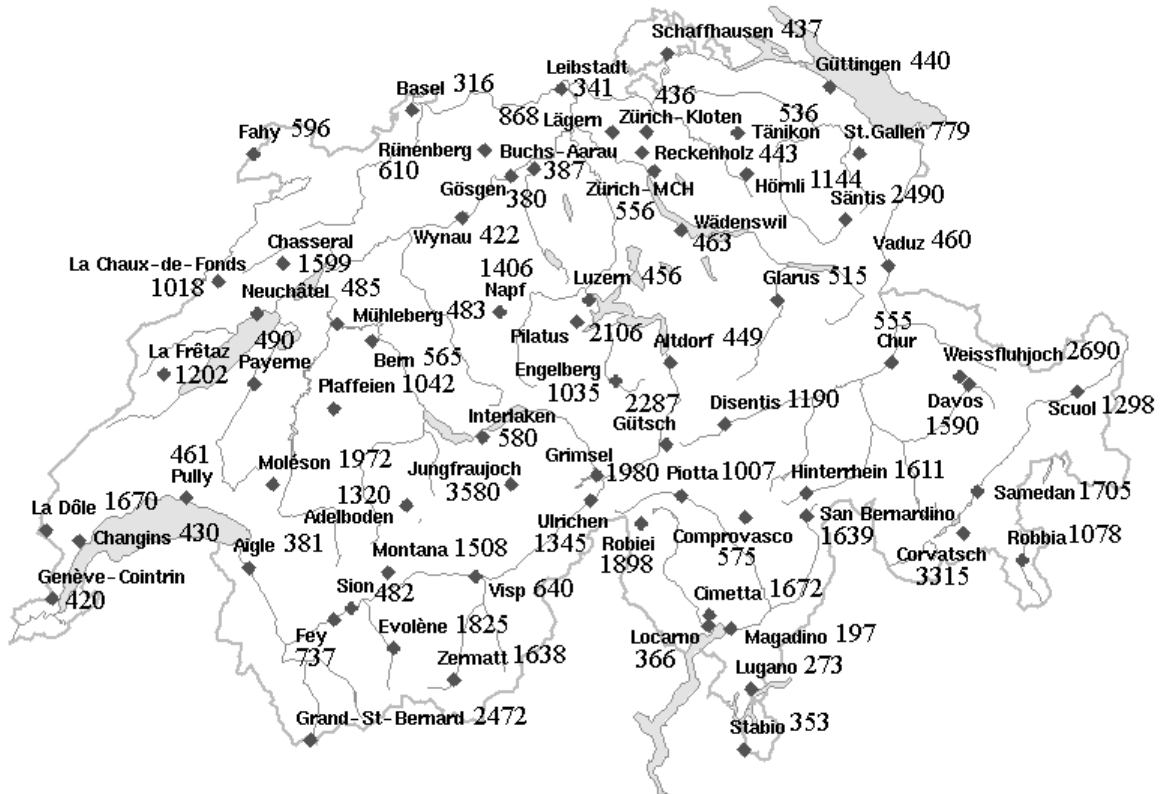


FIGURE B.1: Situation et altitude en mètre des stations météorologiques ANETZ.

## B.1 Energie solaire

L'intensité d'ensoleillement se présente sous forme d'énergie [ $\text{W/m}^2$ ]. Les intensités minimales mensuelles mesurées dans toutes les stations météorologiques sont sans exception le mois de décembre. Pour les valeurs maximales, c'est le mois de juillet à qui appartient ce niveau sauf pour des stations en haute montagne qui se situe soit en mai soit en juin (Figure B.2).

- station de Corvatsch (mai),
- station de Jungfrauoch (juin),
- station de Pilatus (mai),
- station de Säntis (mai),
- station de Weissfluhjoch (mai).

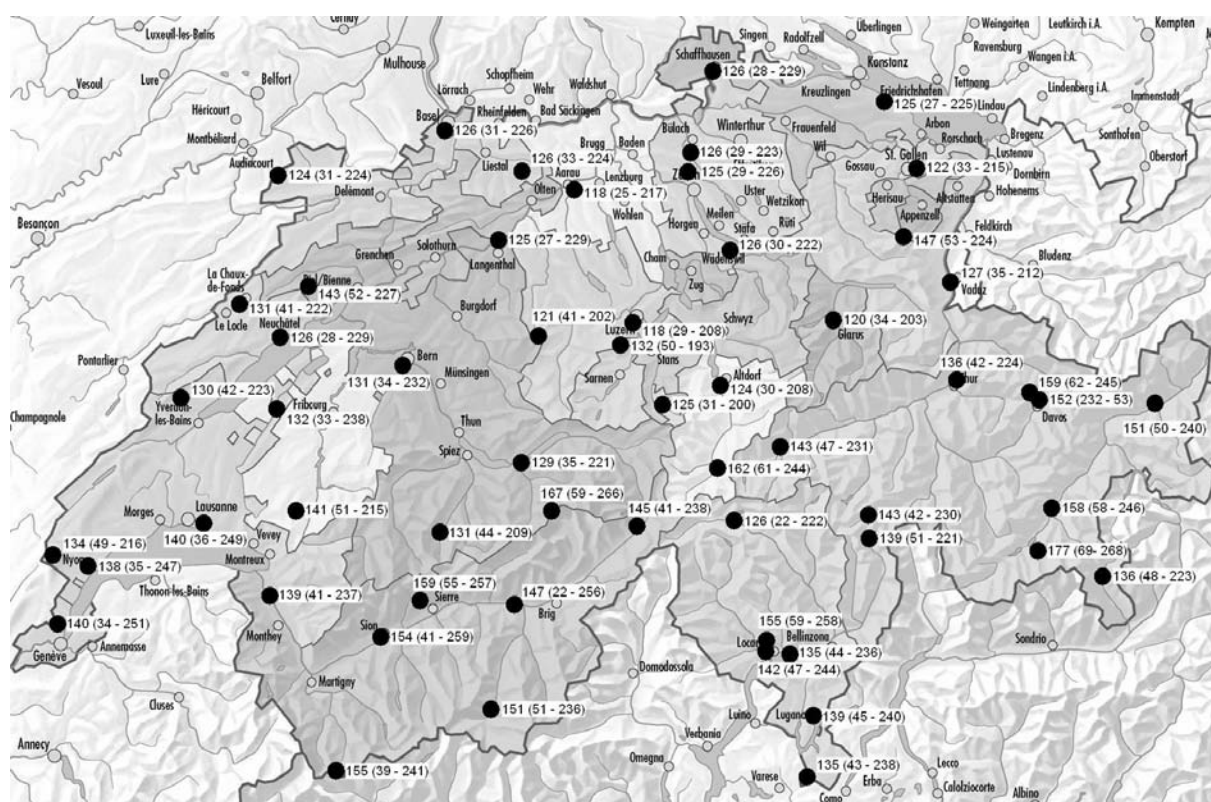


FIGURE B.2: Intensité de l'ensoleillement en [ $\text{W/m}^2$ ], valeur moyenne annuelle et entre parenthèse : valeur mensuelle minimale - valeur mensuelle maximale (toutes ces valeurs sont moyennées sur les années 1981 - 2000).

La durée d'insolation présente une hétérogénéité plus importante entre les différentes stations, la période de plus longue présence du soleil se situe entre les mois de juillet à octobre. Tandis que les périodes de minimales de présence de soleil se situent soit entre décembre et janvier, soit entre avril et mai pour une grande partie des stations météorologiques (Figure B.3). Les zones touchées par un temps d'ensoleillement minimales entre décembre et janvier sont une partie du Valais et la partie du plateau entre Zurich et Bâle. Quelques stations sortent de cette zone mentionnée et sont des points hétérogènes dans le réseau des stations, c'est à dire les stations de Genève-aéroport, la station de Pully, la station de la Frêtaz, la station de Neuchâtel, la station de Bern, la station de Güttingen, la station de Chur, la station de Altdorf la station de Interlaken la station de Piotta et la station de Lugano. Les zones touchées par un temps d'ensoleillement minimales entre avril et mai se situent sur l'est de la Suisse, y compris une partie du plateau, le canton des Grisons le canton du Tessin, le canton de Fribourg et une zone dans l'arc lémanique proche de Nyon. Les zones touchées par un ensoleillement maximale entre juillet et août sont les stations de plaine tandis qu'entre septembre et octobre se sont plutôt les stations de montagne. La station de Cimetta a, étrangement, une durée d'insolation maximale le mois de décembre.

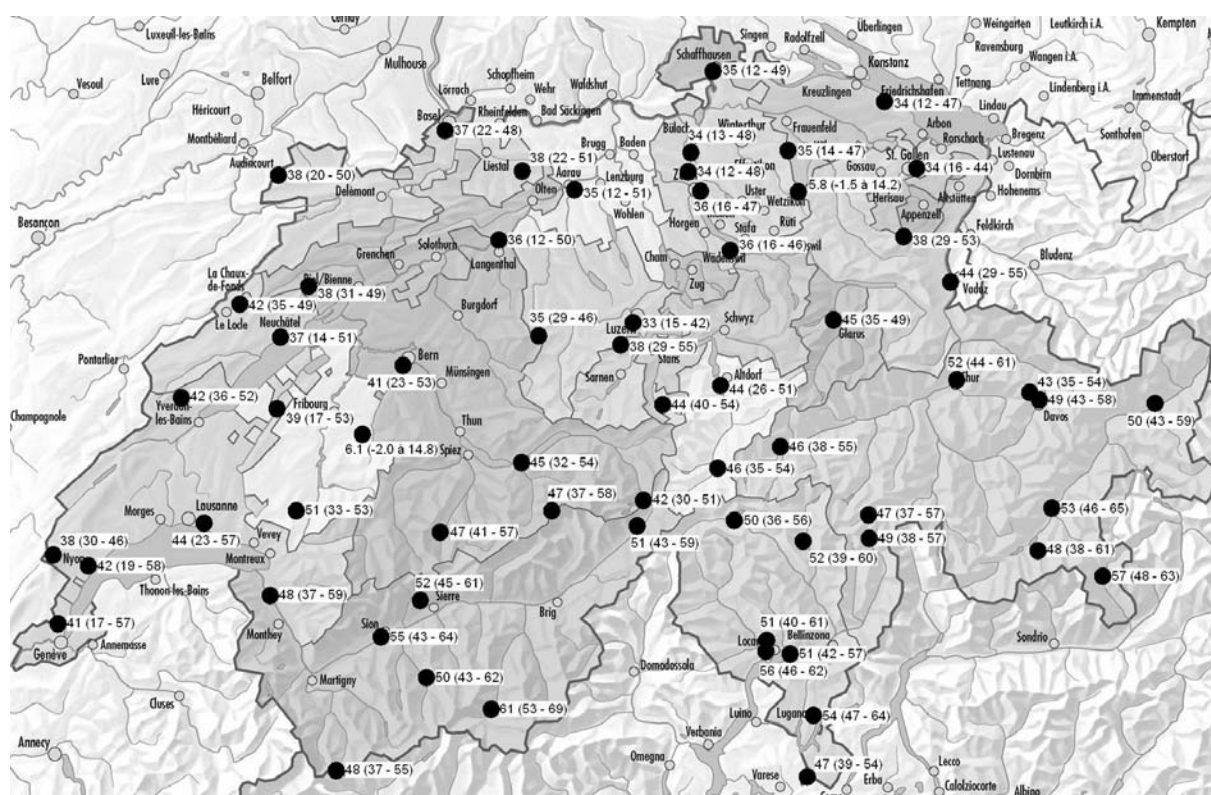


FIGURE B.3: Durée d'insolation relative en [%], valeur moyenne annuelle et entre parenthèse : valeur mensuelle minimale - valeur mensuelle maximale (toutes ces valeurs sont moyennées sur les années 1961 - 1990).

Les températures moyennes mensuelles mesurées sont maximales pour toutes les stations maximales au mois de juillet. Tandis que pour les valeurs minimales, elles se situent durant le mois de janvier pour toutes les stations sauf en février pour quelques stations en montagne (La station du Chasseral, la station de la Cimetta, la station de Corvatsch, la station de la Dole, la station du Grand-Saint-Bernard, la station de Gütsch, la station de la Jungfrauoch, la station du Moléson, la station de Napf, la station du Pilatus et la station du Weissfluhjoch) (Figure B.4).

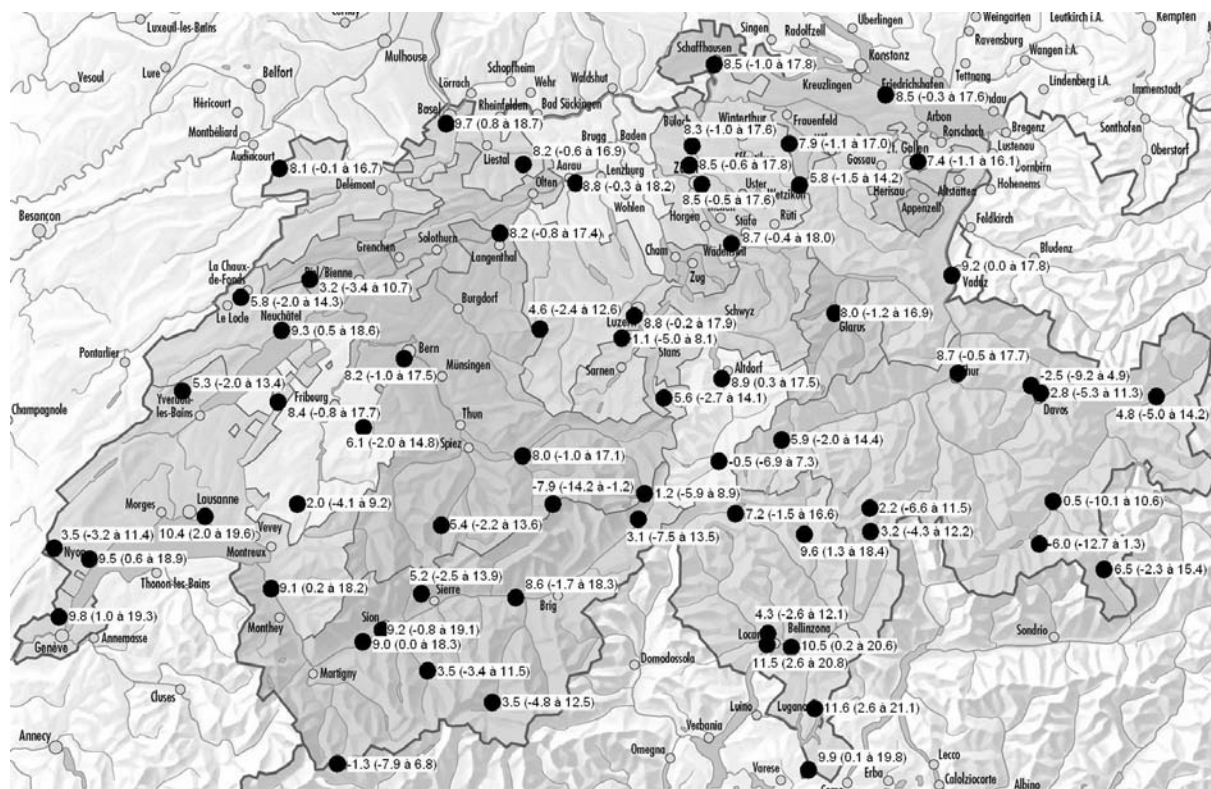


FIGURE B.4: Température en [°C], valeur moyenne annuelle et entre parenthèse : valeur mensuelle minimale - valeur mensuelle maximale (toutes ces valeurs sont moyennées sur les années 1961 - 1990).

## B.2 Energie éolienne

La vitesse de vents mesurée par les stations météorologiques présente une assez grande variabilité quant à la position mensuelle des vents maximaux et minimaux (Figure B.5). La vitesse de vents minimaux est mesurée durant les mois d'août à décembre. Les zones touchées par cette vitesse de vents minimale entre novembre et décembre sont le Haut Valais depuis Sion à l'est du canton des Grisons et au sud du canton du Tessin. Le solde se situe entre août et septembre. La moyenne des vitesses de vents enregistrés les plus intenses sont enregistrées durant les périodes de décembre en avril. Elle est plus importante en décembre et en janvier dans et au pied du jura et sur les sommets montagneux, sinon le mois d'avril regroupe la plupart des stations.

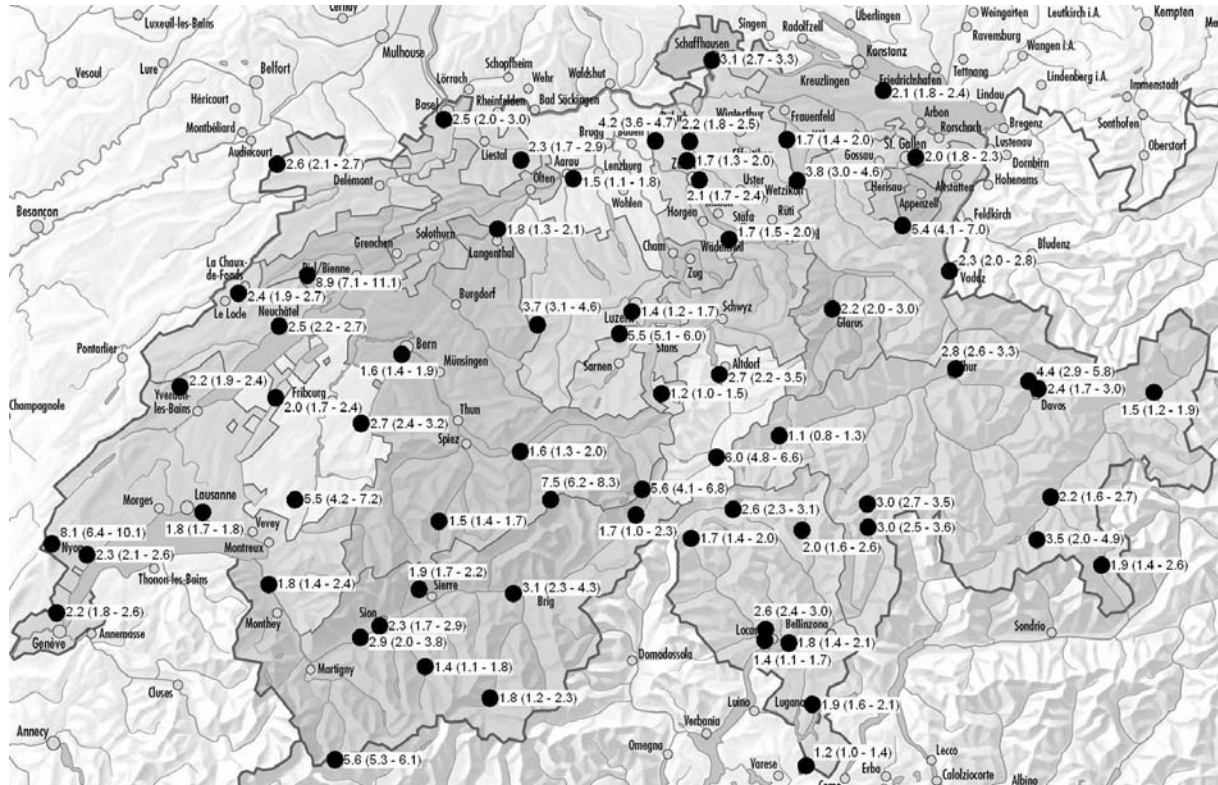


FIGURE B.5: Vitesse du vent en [m/s], valeur moyenne annuelle et entre parenthèse : valeur mensuelle minimale - valeur mensuelle maximale (toutes ces valeurs sont moyennées sur les années 1961 - 1990).

### B.3 Précipitations

Les hauteurs cumulées mensuelles des précipitations sont souvent les plus importants autour du mois d'août. Pour le solde des stations, ils s'étendent durant les mois de mars à juin, septembre, novembre et décembre. Il est également difficile de trouver des mois préférentiels corrélés à une région pour les mesures de hauteur de précipitations minimales, sauf pour le mois décembre pour tout le canton du Tessin. Le reste s'étend de janvier en avril, en y ajoutant quelques stations durant le mois de juillet (Figure B.6).

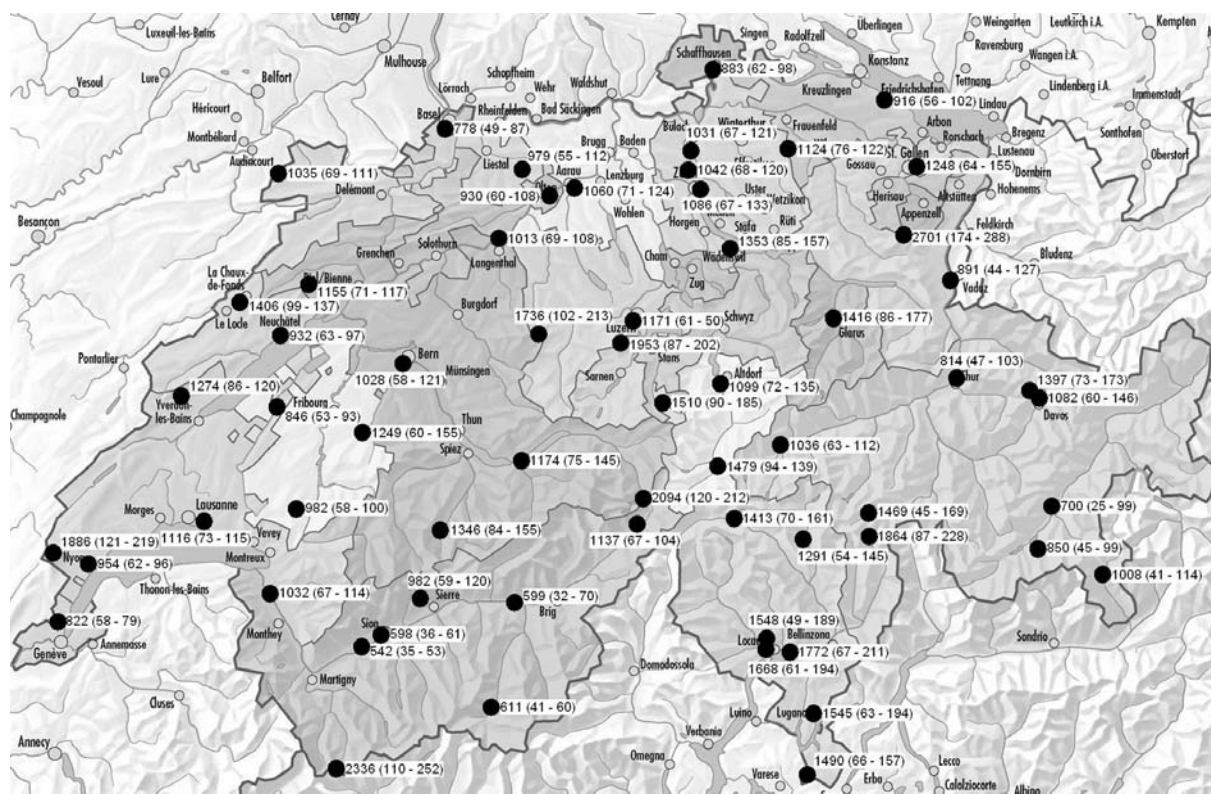


FIGURE B.6: Hauteur de pluie cumulée en [mm], valeur cumulée annuelle et entre parenthèse : valeur mensuelle cumulée minimale - valeur mensuelle cumulée maximale (toutes ces valeurs sont moyennées sur les années 1961 - 1990).

Le taux d'humidité mensuel moyen dans l'air présente également une grande dispersion dans chaque région. Le temps le plus sec se trouve dans le canton du Valais et du Tessin et une partie du canton







## Annexe C: Enquête sur l'épandage de produits de déverglaçage dans différentes régions de Suisse

Avant de fournir les résultats de l'enquête (Tableau C.1), quelques définitions mathématiques sont introduites pour mieux comprendre les hypothèses utilisées dans le traitement des données.

Une masse totale annuelle d'épandage de chlorure de sodium et calcium  $M_{\text{tot}}$  est calculée à partir des données relevées par le service des Routes Nationales et Cantonales. Plusieurs régions utilisent un mélange confectionné avec deux types de produits de déverglaçage, les chlorures de sodium ( $\text{NaCl}$ ) ou les chlorures de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ). Les problèmes de dépassivation des aciers d'armature proviennent surtout de la présence de chlore, si bien que les quantités de chlorure de calcium sont rapportées au chlorure de sodium en considérant la quantité d'ions chlorures. Le rapport des masses molaire permet de calculer une masse équivalente de chlorure de sodium.

$$m_1 = \frac{m_{\text{Cl}}}{m_{\text{NaCl}}} = \frac{35.453}{58.443} \cong 0.607 \quad (\text{EQ C.1})$$

$$m_2 = \frac{m_{\text{Cl}_2}}{m_{\text{CaCl}_2}} = \frac{70.906}{110.986} \cong 0.639 \quad (\text{EQ C.2})$$

$$M_{\text{NaCl;eq}} = M_{\text{CaCl}_2} \cdot \frac{m_2}{m_1} \quad (\text{EQ C.3})$$

$$M_{\text{tot}} = M_{\text{NaCl}} + M_{\text{NaCl;eq}} \quad (\text{EQ C.4})$$

- $m_1$  rapport des masses molaires des ions chlorures et des chlorure de sodium,
- $m_2$  rapport des masses molaires des ions chlorures et des chlorure de calcium,
- $m_{\text{Cl}}$  [g/mol] masses molaires des ions chlorures,
- $m_{\text{NaCl}}$  [g/mol] masses molaires des chlorures de sodium,
- $m_{\text{Cl}_2}$  [g/mol] masses molaires de deux ions chlorures,
- $m_{\text{CaCl}_2}$  [g/mol] masses molaires des chlorures de calcium,
- $M_{\text{NaCl}}$  [g] masses des chlorures de sodium,
- $M_{\text{NaCl,eq}}$  [g] masses des chlorures de calcium rapportées aux chlorure de sodium,
- $M_{\text{CaCl}_2}$  [g] masses des chlorures de calcium,
- $M_{\text{tot}}$  [g] masses des chlorures de sodium et des chlorures de calcium.

La masse totale de chlorure de sodium et de calcium par unité de surface  $q_{\text{NaCl}}$  s'obtient en considérant la masse totale annuelle  $M_{\text{tot}}$  de chlorure de sodium et de calcium dans les différentes régions rapportée à la surface totale des chaussées  $A_{\text{tot}}$  de routes correspondantes.

$$q_{\text{NaCl}} = \frac{M_{\text{tot}}}{A_{\text{tot}}} \quad (\text{EQ C.5})$$

- $A_{\text{tot}}$  [m<sup>2</sup>] surface de chaussées, où l'épandage a été effectué,
- $q_{\text{NaCl}}$  [g/m<sup>2</sup>] quantité surfacique d'épandage de chlorures de sodium.

## C.1 Enquêtes sur les moyens mécaniques

Fondant	Année	Alpes Gütsch	Grisons Davos	Tessin Lugano	Lémanique Pully	Valais Sion	Plateau Kloten
NaCl	1966	-	235	-	-	-	-
	1967	-	881	-	-	-	-
	1968	-	933	-	-	-	-
	1969	-	2743	-	-	-	-
	1970	-	2292	-	1802	-	-
	1971	-	1940	-	830	-	-
	1972	-	2710	-	573	-	-
	1973	-	2376	-	1229	-	-
	1974	-	2982	-	1030	-	-
	1975	-	1893	-	896	-	-
	1976	-	2798	-	2635	-	-
	1977	-	3418	-	2959	-	-
	1978	-	2338	-	3045	-	-
	1979	-	2707	-	3023	-	-
	1980	-	2896	-	3441	-	-
	1981	-	3515	-	4607	-	-
	1982	-	2475	-	2701	-	-
	1983	-	3206	-	3169	-	-
	1984	-	2373	-	5866	-	-
	1985	-	3452	-	5884	-	-
	1986	-	3768	-	6166	-	4089
	1987	-	2292	-	2869	-	2595
	1988	-	1375	-	3208	-	2825
	1989	-	1713	-	741	-	495
	1990	-	2699	-	2626	-	1900
	1991	-	3088	-	1857	-	1585
	1992	-	1662	-	1240	-	710
	1993	-	3179	-	2389	-	1341
	1994	792	2592	-	1775	-	780
	1995	673	3009	-	5713	-	2655
	1996	510	2942	-	4333	-	3575
	1997	434	2552	155	2852	-	1480
	1998	1109	4567	130	3011	130	2374
	1999	792	3741	220	7323	220	4299
	2000	-	3666	378	1903	378	1601
	2001	-	2571	164	2746	164	2961
	2002	-	3167	231	1349	-	940

TABLEAU C.1: Résultats détaillés de l'enquête de l'épandage de produits de déverglaçage, résultats en tonne [Zaugg04].

Fondant	Année	Alpes Gütsch	Grisons Davos	Tessin Lugano	Lémanique Pully	Valais Sion	Plateau Kloten
CaCl <sub>2</sub>	1966	-	184	-	-	-	-
	1967	-	382	-	-	-	-
	1968	-	347	-	-	-	-
	1969	-	643	-	-	-	-
	1970	-	441	-	-	-	-
	1971	-	231	-	203	-	-
	1972	-	147	-	-	-	-
	1973	-	325	-	-	-	-
	1974	-	193	-	-	-	-
	1975	-	125	-	-	-	-
	1976	-	178	-	-	-	-
	1977	-	359	-	2	-	-
	1978	-	182	-	14	-	-
	1979	-	330	-	67	-	-
	1980	-	182	-	23	-	-
	1981	-	239	-	70	-	-
	1982	-	115	-	19	-	-
	1983	-	114	-	5	-	-
	1984	-	130	-	9	-	-
	1985	-	146	-	43	-	-
	1986	-	138	-	37	-	-
	1987	-	62	-	38	-	-
	1988	-	41	-	2	-	-
	1989	-	34	-	2	-	-
	1990	-	74	-	4	-	-
	1991	-	46	-	22	-	-
	1992	-	38	-	2	-	-
	1993	-	79	-	5	-	-
	1994	138	64	-	3	-	-
	1995	17	119	-	5	-	-
	1996	76	78	-	33	-	-
	1997	1	98	-	3	-	-
	1998	126	76	-	1	-	-
	1999	130	5	-	13	-	-
	2000	-	11	-	2	-	-
	2001	-	61	-	5	-	-
	2002	-	73	-	4	-	-

TABLEAU C.1: Résultats détaillés de l'enquête de l'épandage de produits de déverglaçage, résultats en tonne [Zaugg04].

Fondant	Année	Alpes Gütsch	Grisons Davos	Tessin Lugano	Lémanique Pully	Valais Sion	Plateau Kloten
$M_{NaCl}$	$10^6[g]$	4310	96746	1278	95791	892	36205
$M_{CaCl_2}$	$10^6[g]$	488	6089	-	636	-	-
$M_{NaCl,eq}$	$10^6[g]$	514	6410	-	670	-	-
$M_{tot}$	$10^6[g]$	4824	103156	1278	96461	892	36205
$M_{tot}$	$10^6[g/an]$	804	2788	213	2923	223	2130
$n_h$	[jours/an]	135.8	64.3	0.8	12.2	10.4	24.5

TABLEAU C.1: Résultats détaillés de l'enquête de l'épandage de produits de déverglaçage, résultats en tonne [Zaugg04].

$n_h$  [jours/an] nombre de jours hivernaux due à la rigueur de l'hiver (définition § 2.1).

Dans le rapport de thèse, une vulgarisation simple sera adoptée et la mention de chlorures de calcium sera abandonnée. Ces données ont été récoltées dans le cadre d'une enquête effectuée dans un travail de diplôme, les données proviennent des services publics suivants.

- Alpes (Gütsch), Walter Steiner de Tiefbauamt des Kanton Uri,
- Grisons (Davos), Aurelio Quinter de Tiefbauamt des Kanton Graubünden,
- Tessin (Lugano), Walter Franceschina de l'ufficio del coordinamento dei centri manutenzione autos-tradali,
- Lémanique (Pully), Jean-Claude Meige du service des routes du canton de Vaud,
- Valais (Sion), Jean-Paul Melly du service des routes du canton du Valais,
- Plateau (Kloten), Urs Egger, Strasseninspektorat des Kanton Zürich.

## C.2 Enquête sur l'épandage automatique de chlorure de sodium

Chaque installation automatique de salage est rattachée à une station météorologique se trouvant sur la zone de l'épandage. Il existe également des sous-stations rattachées à une même station météorologique. Ces sous-stations n'apparaissent pas dans les résultats de l'enquête, mais sont directement intégrés dans les résultats de la station principale. Les quantités de saumure sont obtenues en considérant le nombre de giclages de chaque assiette ou buse se trouvant sur le tronçon de route étudié. Le nombre de giclages est ensuite directement comparé à l'abaissement du niveau des citernes ou réservoirs durant la même période, ce qui fournit directement les quantités de saumure déversées sur la chaussée.

Les données ont été fournies par les collectivités publiques et les entreprises suivantes.

- Boschung SA, Pierre-Alain Brodard et Steve Voisard,
- Pont de Flamatt dans le canton de Fribourg, Brügger Laurent et Gambera Giuseppe du DAEC - Service des ponts et chaussées du canton de Fribourg,
- Pont des Aigues-Vertes à Genève, Pascal Weber, Fouillerat Roland, Leutwyler René, Imhof Daniel, Rodriguez Robert de la division des ouvrages d'art (DAEL) de l'Etat de Genève et Pascal Laïti de Thermelec SA,
- Contournement de Lausanne dans le canton de Vaud, Olivier Blaser, Département des infrastructures (DINF) de l'Etat de Vaud.

Région	Station	Période de données		Saumure [g/m <sup>2</sup> an]	n <sub>h</sub> [jours/an]
<b>Pont de Flamatt dans le canton de Fribourg</b>	<b>11.1</b>	<b>20.06.2002</b>	<b>14.02.2005</b>	<b>328.3</b>	<b>16.19</b>
	<b>11.3</b>	<b>20.06.2002</b>	<b>14.02.2005</b>	<b>377.1</b>	<b>21.09</b>
	<b>11.25</b>	<b>27.10.2004</b>	<b>14.02.2005</b>	<b>488.6</b>	<b>18.64</b>
<b>Pont des Aigues-Vertes à Genève</b>	<b>6</b>	<b>01.01.2001</b>	<b>14.02.2005</b>	<b>24.60</b>	<b>6.55</b>
	<b>7</b>	<b>01.01.2001</b>	<b>14.02.2005</b>	<b>43.97</b>	<b>5.09</b>
<b>Contournement de Lausanne dans le canton de Vaud</b>	<b>3</b>	<b>06.02.2002</b>	<b>15.02.2005</b>	<b>21.74</b>	<b>4.29</b>
	<b>6</b>	<b>06.02.2002</b>	<b>15.02.2005</b>	<b>22.22</b>	<b>4.62</b>
	<b>8</b>	<b>06.02.2002</b>	<b>15.02.2005</b>	<b>17.62</b>	<b>5.28</b>
	<b>10</b>	<b>06.02.2002</b>	<b>15.02.2005</b>	<b>26.71</b>	<b>3.30</b>
	<b>13</b>	<b>06.02.2002</b>	<b>15.02.2005</b>	<b>24.65</b>	<b>0.99</b>
	<b>14</b>	<b>06.02.2002</b>	<b>15.02.2005</b>	<b>25.84</b>	<b>4.62</b>
	<b>16</b>	<b>06.02.2002</b>	<b>15.02.2005</b>	<b>29.66</b>	<b>5.28</b>
	<b>18</b>	<b>06.02.2002</b>	<b>15.02.2005</b>	<b>32.43</b>	<b>9.58</b>
	<b>20</b>	<b>06.02.2002</b>	<b>15.02.2005</b>	<b>18.40</b>	<b>11.56</b>
	<b>24</b>	<b>06.02.2002</b>	<b>15.02.2005</b>	<b>32.40</b>	<b>4.29</b>
	<b>26</b>	<b>06.02.2002</b>	<b>15.02.2005</b>	<b>39.95</b>	<b>5.94</b>
	<b>28</b>	<b>06.02.2002</b>	<b>15.02.2005</b>	<b>34.14</b>	<b>2.81</b>
	<b>30</b>	<b>06.02.2002</b>	<b>15.02.2005</b>	<b>39.96</b>	<b>11.06</b>

TABLEAU C.2: Résultats détaillés de l'enquête de l'épandage automatique de chlorure de sodium.



## Annexe D: Traitement des données des capteurs installés sur le pont de la Denève - A12

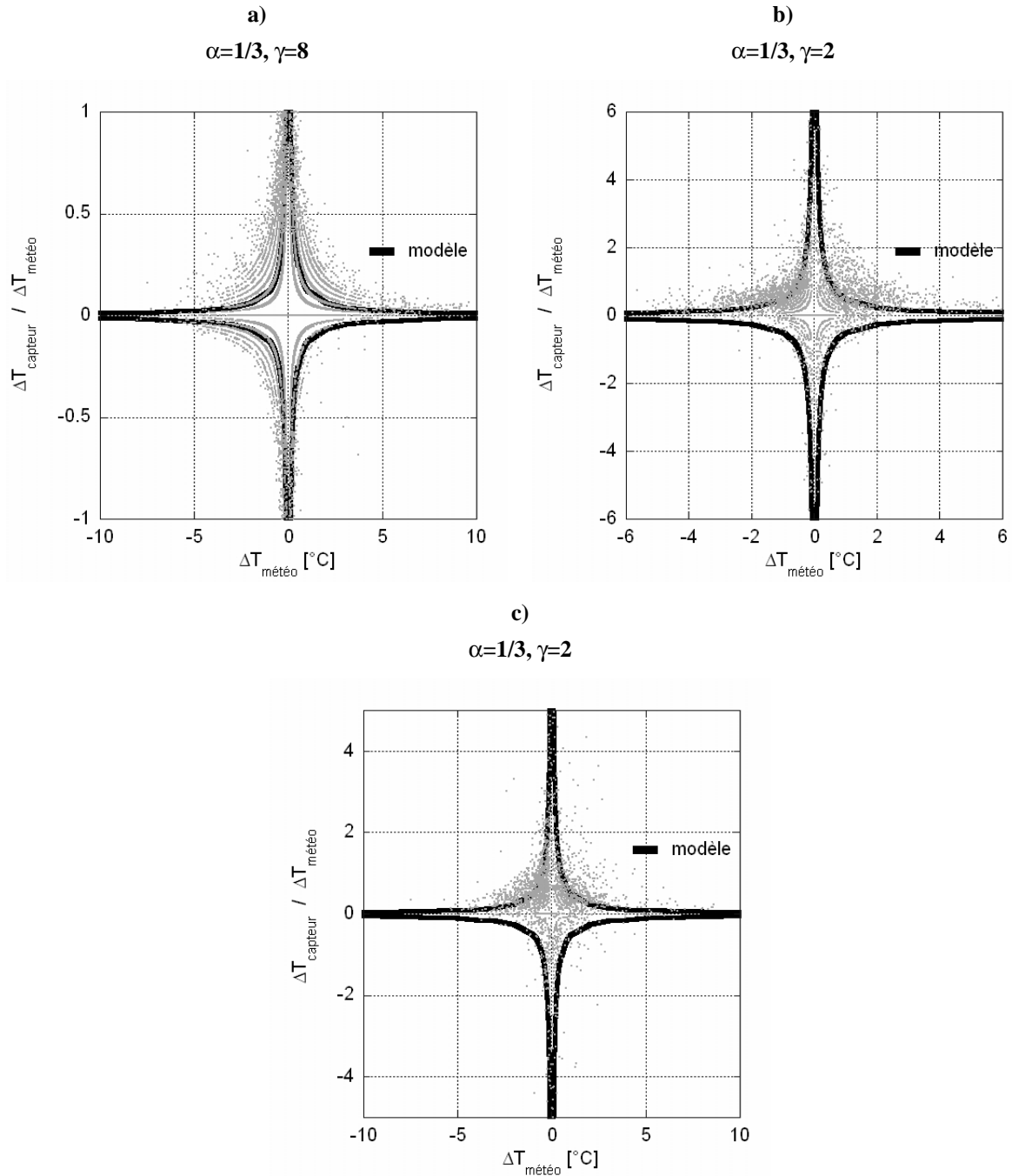


FIGURE D.1: Nuage de points et modèle pour le traitement des données météorologiques de température, a) dans les caissons, b) sous la dalle de roulement, c) au-dessus d'un plan d'eau.

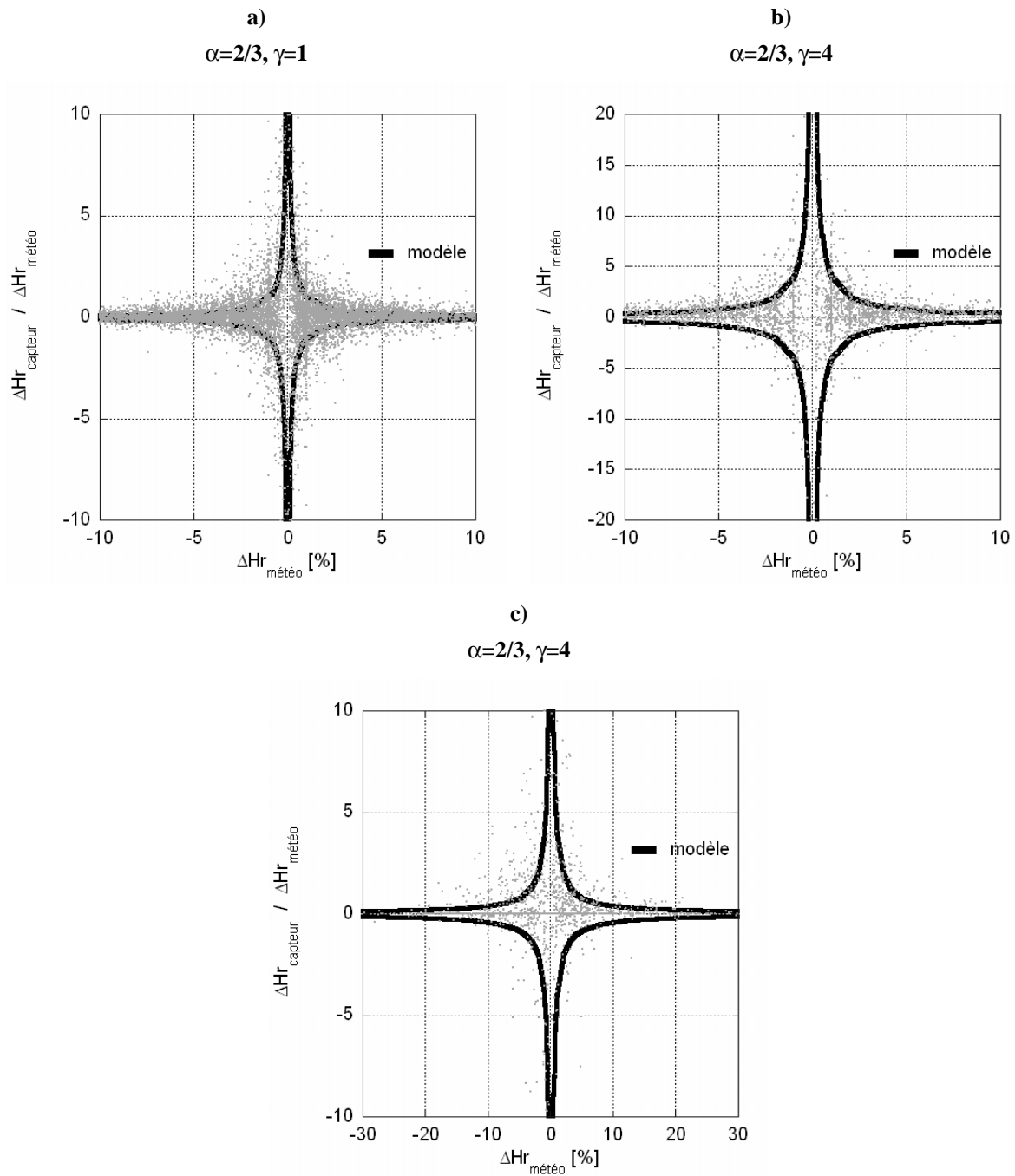


FIGURE D.2: Nuage de points et modèle pour le traitement des données météorologiques d'humidité relative, a) dans les caissons, b) sous la dalle de roulement, c) au-dessus d'un plan d'eau.



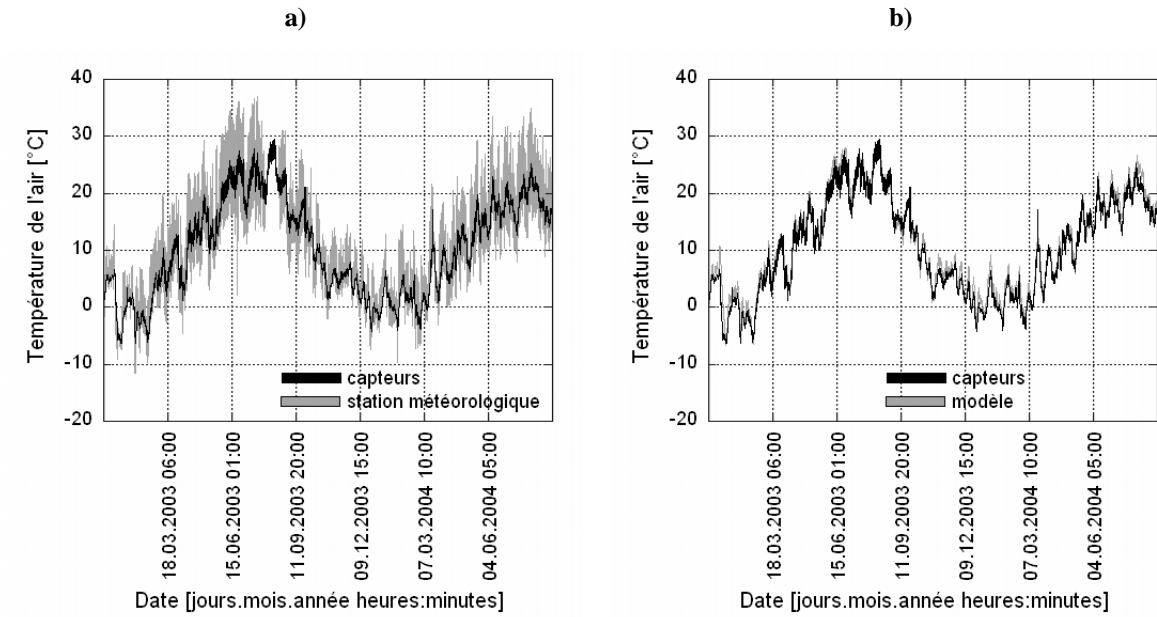


FIGURE D.3: Transformation des données de la station météorologique (a) au modèle (b), pour les données de température et pour les capteurs disposés dans les caissons.

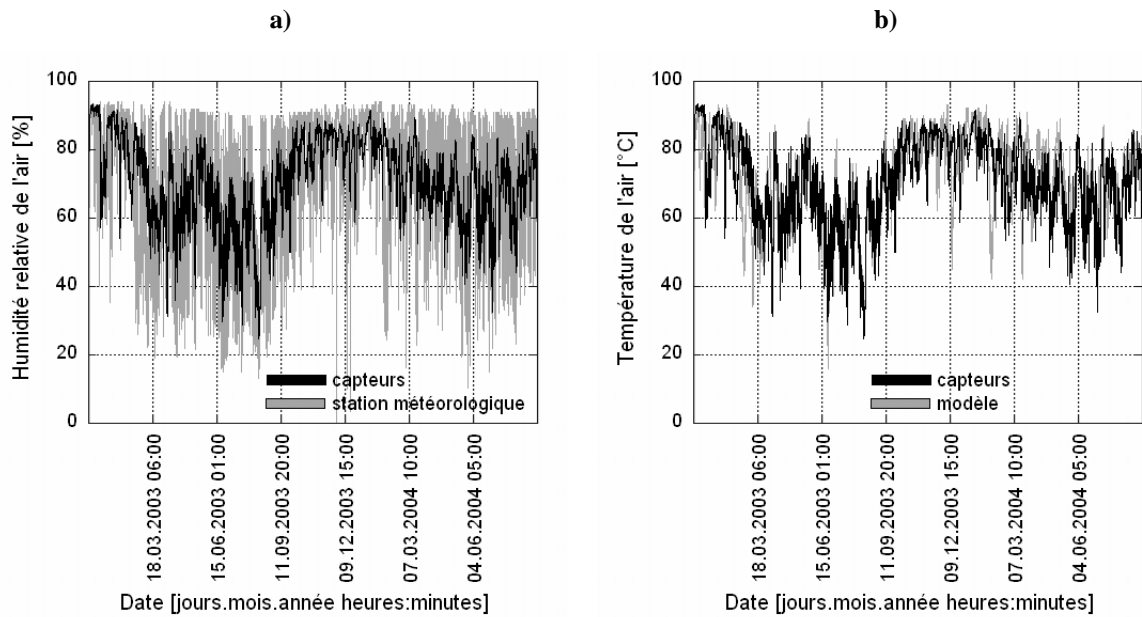


FIGURE D.4: Transformation des données de la station météorologique (a) au modèle (b), pour les données d'humidité relative et pour les capteurs disposés dans les caissons.

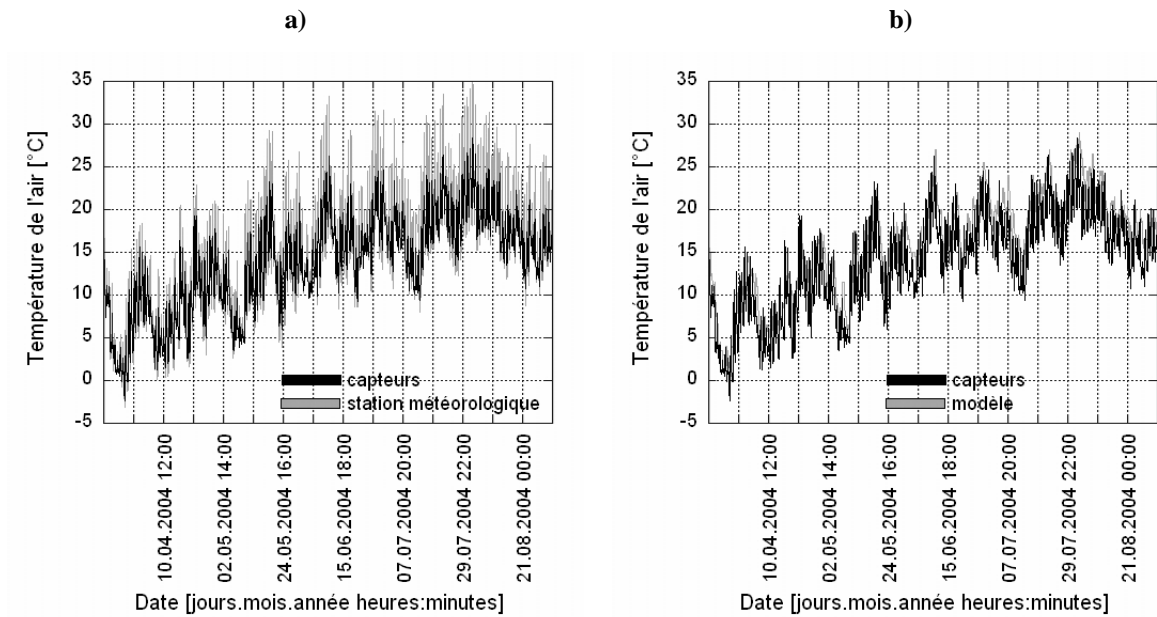


FIGURE D.5: Transformation des données de la station météorologique (a) au modèle (b), pour les données de température et pour les capteurs disposés sous la dalle de roulement.

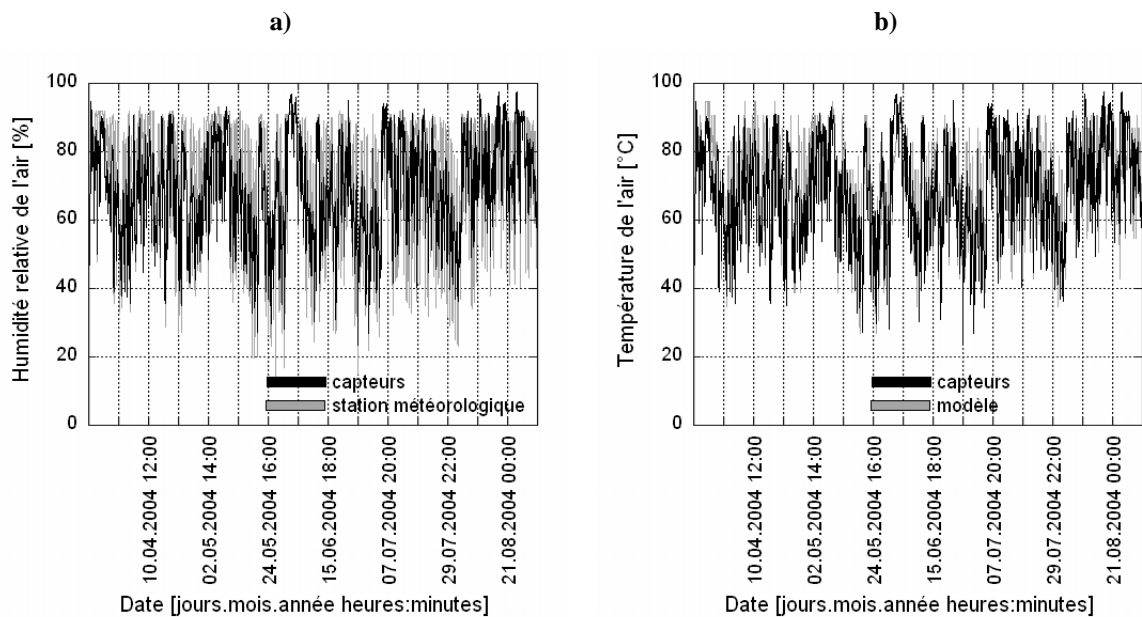


FIGURE D.6: Transformation des données de la station météorologique (a) au modèle (b), pour les données d'humidité relative et pour les capteurs disposés sous la dalle de roulement.

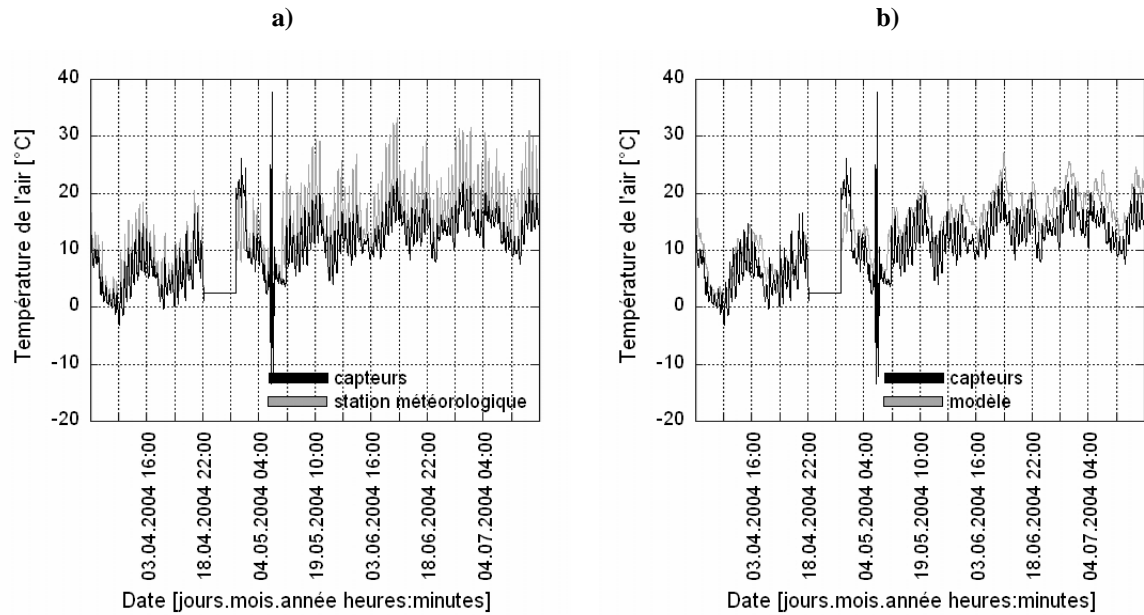


FIGURE D.7: Transformation des données de la station météorologique (a) au modèle (b), pour les données de température et pour les capteurs disposés au-dessus d'un plan d'eau.

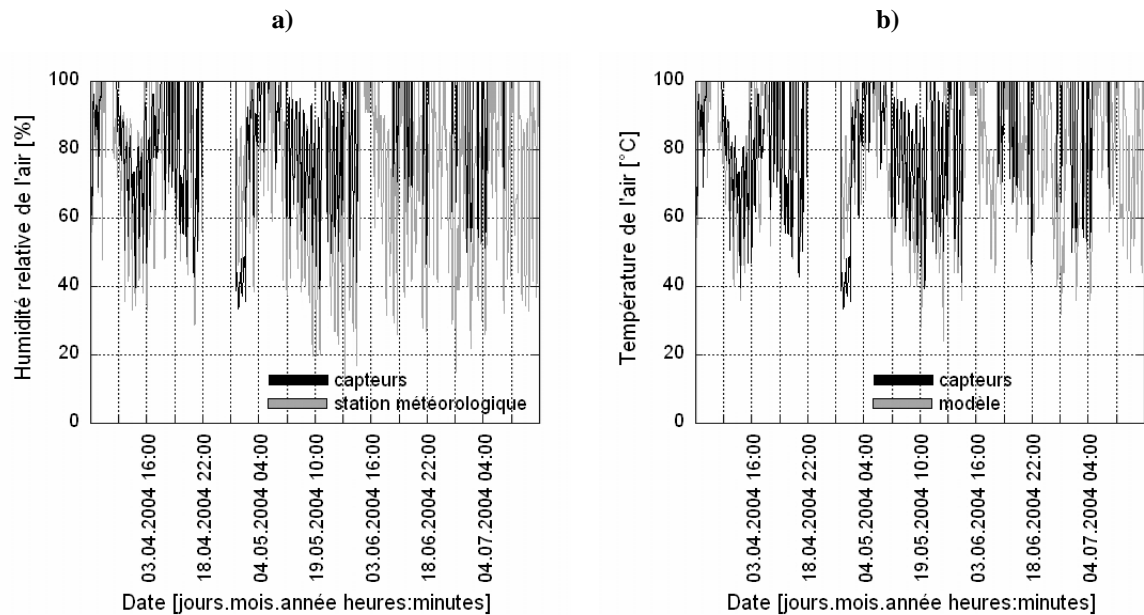


FIGURE D.8: Transformation des données de la station météorologique (a) au modèle (b), pour les données d'humidité relative et pour les capteurs disposés au-dessus d'un plan d'eau.

Les données de la station météorologique du pont sur la Denève et les autorisations pour l'équipement du pont par des capteurs ont été fournies par les instances suivantes.

- Paul Graber, Sébastien Nendaz du Département des Infrastructures de l'Etat de Vaud,
- Pierre-Alain Brodard et Steve Voisard de l'entreprise Boschung SA.



## Annexe E: Modèle de convection et de diffusion

### E.1 Modèle de transport

Le modèle TransChlor utilise les équations de la diffusion, basées sur la loi deuxième loi de Fick, et un modèle de convection. Dans cette annexe, le développement de la forme différentielle en forme numérique, des algorithmes sont développés permettant l'implémentation aisée d'un code. C'est également celui utilisé pour la programmation dans le modèle TransChlor.

En partant de l'équation générale (EQ. 3.1), le vecteur  $\vec{v}$  est transformé en scalaire  $v$  et le vecteur  $\vec{w}$  est transformé en gradient dans l'espace de  $v$  (EQ. E.1). Ces deux transformations permettent de généraliser le problème sans parler d'un mode de transport particulier. Les matrices, en majuscules, sont transformées en constantes [Zienkiewicz71].

$$b \cdot \frac{\partial v}{\partial t} = \text{div}(a \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(v)) - (c \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(v)) \quad (\text{EQ E.1})$$

- $b$  constante,
- $v$  scalaire représentant une concentration ou une quantité comme la température, la quantité d'eau, etc.,
- $t$  temps,
- $a$  coefficient de diffusion,
- $c$  coefficient de convection.

L'espace unidimensionnel est développé pour le modèle TransChlor (EQ. E.2). Les scalaires  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont des constantes et la simplification suivante peut être opérée (EQ. E.3).

$$b \cdot \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( a \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \right) - \left( c \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (\text{EQ E.2})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{c}{b} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} - \left( \frac{a}{b} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) = 0 \quad (\text{EQ E.3})$$

- $x$  position dans le béton.

En multipliant par une fonction arbitraire  $g$  et en intégrant sur le domaine, l'équation obtenue se nomme la forme forte du problème (EQ. E.4).

$$\int_{x_L}^{x_R} \left( \left( g \cdot \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{c}{b} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} - \left( \frac{a}{b} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) \right] \right) \cdot dx \right) = 0 \quad (\text{EQ E.4})$$

- $x_L, x_R$  bornes de l'intégration, en l'occurrence position d'un élément fini.

Cette fonction arbitraire  $g$ , dépendant également de la position  $x$ , prend la forme suivante lorsqu'on la distribue dans l'équation différentielle. L'intégration par partie permet d'éliminer la dérivée du second ordre (EQ. E.5).

$$\int_{x_L}^{x_R} \left( \left( g \cdot \frac{\partial v}{\partial t} + g \cdot \frac{c}{b} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{a}{b} \cdot \frac{\partial g}{\partial x} \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \right) \cdot dx \right) - \left( \frac{a}{b} \cdot g \cdot \frac{\partial v}{\partial x} \right) \Big|_{x_L}^{x_R} = 0 \quad (\text{EQ E.5})$$

$g$  fonction arbitraire dépendant de la position  $x$ .

Le terme, hors de l'intégrale, représente les conditions de bord. Les conditions de bord seront reprises plus loin lors de l'implémentation numérique. Le pas suivant, la dérivée partielle est explicitée, pour obtenir une formulation numérique (EQ. E.6). Le paramètre  $\theta$  permet de passer d'un domaine implicite à un domaine explicite et sa valeur se situe entre 0.5 et 1. La valeur 0.5 permet une formulation implicite et la valeur de 1 permet une formulation explicite (EQ. E.8) [Jaun03].

$$\int_{x_L}^{x_R} \left( \left( g \cdot \frac{v_{t+\Delta t} - v_t}{\Delta t} + g \cdot \frac{c}{b} \cdot \frac{\partial}{\partial x} ((1-\theta) \cdot v_t + \theta \cdot v_{t+\Delta t}) + \frac{a}{b} \cdot \frac{\partial g}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial x} ((1-\theta) \cdot v_t + \theta \cdot v_{t+\Delta t}) \right) \cdot dx \right) = 0 \quad (EQ E.6)$$

$$\begin{aligned} & \int_{x_L}^{x_R} \left( \left( \frac{g}{\Delta t} + \theta \cdot g \cdot \frac{c}{b} \cdot \frac{\partial}{\partial x} + \theta \cdot \frac{a}{b} \cdot \frac{\partial g}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \right) \cdot v_{t+\Delta t} \cdot dx \right) = \\ & = \int_{x_L}^{x_R} \left( \left( \frac{g}{\Delta t} - ((1-\theta) \cdot g \cdot \frac{c}{b} \cdot \frac{\partial}{\partial x}) - ((1-\theta) \cdot \frac{a}{b} \cdot \frac{\partial g}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial x}) \right) \cdot v_t \cdot dx \right) \end{aligned} \quad (EQ E.7)$$

$$\theta \in [0.5, 1] \quad (EQ E.8)$$

$\theta$  paramètre du modèle définissant une modélisation explicite ou implicite,

$\Delta t$  intervalle de temps.

L'approximation de Galerkin (EQ. E.9) permet d'attribuer une certaine fonction d'interpolation à la fonction arbitraire et au scalaire  $v$  (EQ. E.10) [Rappaz98], l'équation obtenue s'appelle la forme faible de la solution. La forme matricielle et vectorielle permet d'écrire cette équation plus simplement (EQ. E.11).

$$v_t = \sum_j v_{t,j} \cdot n_j(x) \quad (EQ E.9)$$

$$\begin{aligned} & \int_{x_L}^{x_R} \left( \left( n_i \cdot \sum_j v_{t+\Delta t,j} \cdot n_j + \Delta t \cdot \theta \cdot n_i \cdot \frac{c}{b} \cdot \sum_j v_{t+\Delta t,j} \cdot \frac{\partial n_j}{\partial x} + \Delta t \cdot \theta \cdot \frac{a}{b} \cdot \frac{\partial n_i}{\partial x} \cdot \sum_j v_{t+\Delta t,j} \cdot \frac{\partial n_j}{\partial x} \right) \cdot dx \right) = \\ & = \int_{x_L}^{x_R} \left( \left( n_i \cdot \sum_j v_{t,j} \cdot n_j + \Delta t \cdot (\theta - 1) \cdot n_i \cdot \frac{c}{b} \cdot \sum_j v_{t,j} \cdot \frac{\partial n_j}{\partial x} + (\theta - 1) \cdot \frac{a}{b} \cdot \frac{\partial n_i}{\partial x} \cdot \sum_j v_{t,j} \cdot \frac{\partial n_j}{\partial x} \right) \cdot dx \right) \end{aligned} \quad (EQ E.10)$$

$$\begin{aligned} & \int_{x_L}^{x_R} ([N(x)]^T \cdot [N(x)] \cdot dx) \cdot \left\{ \overrightarrow{v_{t+\Delta t}} \right\} + \Delta t \cdot \theta \cdot \int_{x_L}^{x_R} ([N(x)]^T \cdot \frac{c}{b} \cdot [B(x)] \cdot dx) \cdot \left\{ \overrightarrow{v_{t+\Delta t}} \right\} + \\ & + \Delta t \cdot \theta \cdot \int_{x_L}^{x_R} ([B(x)]^T \cdot \frac{a}{b} \cdot [B(x)] \cdot dx) \cdot \left\{ \overrightarrow{v_{t+\Delta t}} \right\} = \int_{x_L}^{x_R} ([N(x)]^T \cdot [N(x)] \cdot dx) \cdot \left\{ \overrightarrow{v_t} \right\} + \\ & + \Delta t \cdot (\theta - 1) \cdot \int_{x_L}^{x_R} ([N(x)]^T \cdot \frac{c}{b} \cdot [B(x)] \cdot dx) \cdot \left\{ \overrightarrow{v_t} \right\} + \Delta t \cdot (\theta - 1) \cdot \int_{x_L}^{x_R} ([B(x)]^T \cdot \frac{a}{b} \cdot [B(x)] \cdot dx) \cdot \left\{ \overrightarrow{v_t} \right\} \end{aligned} \quad (EQ E.11)$$

$n$  paramètre de l'approximation de Galerkin de la fonction d'interpolation,

- $i, j$  indices tensorielles,  
 $[N(x)]$  matrice des fonctions d'interpolation,  
 $[B(x)]$  matrice de relation flux et concentration de  $v$ .

## E.2 Fonction d'interpolation

La fonction d'interpolation, utilisée dans le modèle TransChlor, est une fonction linéaire. Un changement de base est opéré en utilisant la coordonnée naturelle  $\xi$ , cette transformation permet d'obtenir un élément fini de deux unités de longueur et l'origine de l'axe se trouve au centre de l'élément fini. La matrice de la fonction d'interpolation, la matrice de relation flux et concentration de  $v$  et le jacobien prend la forme des équations suivantes (EQ. E.12, EQ. E.13, EQ. E.14, EQ. E.15 et EQ. E.16). Le jacobien est une matrice de transformation pour le passage des coordonnées cartésiennes aux coordonnées naturelles [Frey01].

$$\xi = \frac{2 \cdot x}{L} \quad (EQ. E.12)$$

$$[N(\xi)] = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 - \xi & 1 + \xi \end{bmatrix} \quad (EQ. E.13)$$

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial \xi} & \frac{\partial N_2}{\partial \xi} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \frac{x_2 - x_1}{2} = \frac{L}{2} \quad (EQ. E.14)$$

$$[B(\xi)] = [B(x)] = \frac{\partial}{\partial x}[N(x)] = \frac{\partial}{\partial \xi}[N(\xi)] \cdot [J]^{-1} = \frac{1}{L} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (EQ. E.15)$$

$$dx = [J] \cdot d\xi \quad (EQ. E.16)$$

- $L$  longueur dans l'échelle des coordonnées cartésiennes de l'élément fini,  
 $[J]$  matrice de transformation, appelé jacobien (ici en l'occurrence, il s'agit d'une matrice 1x1),  
 $\xi$  coordonnée naturelle.

Il est possible d'insérer ces fonctions dans l'expression de la forme faible (EQ. E.11). Chaque intégration de la forme faible est décomposée et on obtient ainsi (EQ. E.17, EQ. E.18 et EQ. E.19).

$$\int_{x_L}^{x_R} ([N(x)]^T \cdot [N(x)] \cdot dx) = \int_{-1}^1 ([N(\xi)]^T \cdot [N(\xi)] \cdot [J] \cdot d\xi) = \frac{L}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (EQ. E.17)$$

$$\int_{x_L}^{x_R} ([N(x)]^T \cdot \frac{c}{b} \cdot [B(x)] \cdot dx) = \int_{-1}^1 ([N(\xi)]^T \cdot \frac{c}{b} \cdot [B(\xi)] \cdot [J] \cdot d\xi) = \frac{c}{2 \cdot b} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (EQ. E.18)$$

$$\int_{x_L}^{x_R} ([B(x)]^T \cdot \frac{a}{b} \cdot [B(x)] \cdot dx) = \int_{-1}^1 ([B(\xi)]^T \cdot \frac{a}{b} \cdot [B(\xi)] \cdot [J] \cdot d\xi) = \frac{a}{L \cdot b} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (EQ E.19)$$

En introduisant ces derniers résultats dans l'expression de la forme faible (EQ. E.11), on obtient le résultat suivant pour un élément fini (EQ. E.20).

$$\begin{aligned} & \left( \frac{L}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} + \Delta t \cdot \theta \cdot \frac{c}{2 \cdot b} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + \Delta t \cdot \theta \cdot \frac{a}{L \cdot b} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \right) \cdot \left\{ \overrightarrow{v_{t+\Delta t}} \right\} = \\ & = \left( \frac{L}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} + \Delta t \cdot (\theta - 1) \cdot \frac{c}{2 \cdot b} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + \Delta t \cdot (\theta - 1) \cdot \frac{a}{L \cdot b} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \right) \cdot \left\{ \overrightarrow{v_t} \right\} \end{aligned} \quad (EQ E.20)$$

### E.3 Assemblage pour la résolution du modèle de transport

La méthode implicite est utilisée pour le modèle TransChlor, fixant ainsi le paramètre  $\theta$  à 0,5. La méthode implicite a été choisie pour garantir une bonne convergence vers la solution exacte, sans que des tests supplémentaires soient nécessaires. Cette convergence est également garantie par itération, car le modèle est non linéaire. Avant de procéder à l'assemblage, l'équation précédente (EQ. E.20) est transformée avec le choix du nouveau paramètre  $\theta$  (EQ. E.21).

$$\begin{aligned} & \left[ \begin{array}{cc} \frac{L}{3} - \frac{\Delta t \cdot c}{4 \cdot b} + \frac{\Delta t \cdot a}{2 \cdot L \cdot b} & \frac{L}{6} + \frac{\Delta t \cdot c}{4 \cdot b} - \frac{\Delta t \cdot a}{2 \cdot L \cdot b} \\ \frac{L}{6} - \frac{\Delta t \cdot c}{4 \cdot b} - \frac{\Delta t \cdot a}{2 \cdot L \cdot b} & \frac{L}{3} + \frac{\Delta t \cdot c}{4 \cdot b} + \frac{\Delta t \cdot a}{2 \cdot L \cdot b} \end{array} \right] \cdot \left\{ \overrightarrow{v_{t+\Delta t}} \right\} = \\ & = \left[ \begin{array}{cc} \frac{L}{3} + \frac{\Delta t \cdot c}{4 \cdot b} - \frac{\Delta t \cdot a}{2 \cdot L \cdot b} & \frac{L}{6} - \frac{\Delta t \cdot c}{4 \cdot b} + \frac{\Delta t \cdot a}{2 \cdot L \cdot b} \\ \frac{L}{6} + \frac{\Delta t \cdot c}{4 \cdot b} + \frac{\Delta t \cdot a}{2 \cdot L \cdot b} & \frac{L}{3} - \frac{\Delta t \cdot c}{4 \cdot b} - \frac{\Delta t \cdot a}{2 \cdot L \cdot b} \end{array} \right] \cdot \left\{ \overrightarrow{v_t} \right\} \end{aligned} \quad (EQ E.21)$$

L'assemblage consiste à généraliser l'équation précédente, établie pour 1 élément, pour  $n$  éléments. Pour ce faire, il suffit de résoudre un système linéaire (EQ. E.22 et EQ. E.23).

$$[D] \cdot \left\{ \overrightarrow{v_{t+\Delta t}} \right\} = \{ \vec{b} \} \quad (EQ E.22)$$

$$\begin{bmatrix} d_{10} & d_{00} & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ d_{20} & d_{11} & d_{01} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_{21} & d_{12} & d_{02} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & d_{22} & d_{13} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & d_{0,i-1} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{2,i-1} & d_{1i} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & d_{0,n-1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{2,n-1} & d_{1n} \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{array}{c} v_{t+\Delta t, 0} \\ v_{t+\Delta t, 1} \\ v_{t+\Delta t, 2} \\ v_{t+\Delta t, 3} \\ \dots \\ v_{t+\Delta t, i} \\ \dots \\ v_{t+\Delta t, n} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \dots \\ b_i \\ \dots \\ b_n \end{array} \right\} \quad (EQ E.23)$$



- [D] matrice d'assemblage  $n+1 \times n+1$ ,  
d composants de la matrice d'assemblage,  
i position des composants de la matrice d'assemblage,  
n nombre d'éléments finis,  
b vecteur et composants de vecteur d'assemblage  $n+1 \times 1$ .

La construction de cette dernière matrice s'opère en utilisant les prochaines équations (EQ. E.24, EQ. E.25, EQ. E.26 et EQ. E.27). Seulement une partie du polynôme est utilisée pour  $i = 0$  et  $i = n$  (EQ. E.25 et EQ. E.27).

$$d_{0i} = \frac{L_i}{6} + \frac{\Delta t \cdot c_i}{4 \cdot b_i} - \frac{\Delta t \cdot a_i}{2 \cdot L_i \cdot b_i} \quad (EQ. E.24)$$

$$d_{1i} = \frac{L_{i-1}}{3} + \frac{\Delta t \cdot c_{i-1}}{4 \cdot b_{i-1}} + \frac{\Delta t \cdot a_{i-1}}{2 \cdot L_{i-1} \cdot b_{i-1}} + \frac{L_i}{3} - \frac{\Delta t \cdot c_i}{4 \cdot b_i} + \frac{\Delta t \cdot a_i}{2 \cdot L_i \cdot b_i} \quad (EQ. E.25)$$

$$d_{2i} = \frac{L_i}{6} - \frac{\Delta t \cdot c_i}{4 \cdot b_i} - \frac{\Delta t \cdot a_i}{2 \cdot L_i \cdot b_i} \quad (EQ. E.26)$$

$$b_i = \left( \frac{L_{i-1}}{6} + \frac{\Delta t \cdot c_{i-1}}{4 \cdot b_{i-1}} + \frac{\Delta t \cdot a_{i-1}}{2 \cdot L_{i-1} \cdot b_{i-1}} \right) \cdot v_{t,i-1} + \left( \frac{L_{i-1}}{3} - \frac{\Delta t \cdot c_{i-1}}{4 \cdot b_{i-1}} - \frac{\Delta t \cdot a_{i-1}}{2 \cdot L_{i-1} \cdot b_{i-1}} + \right. \\ \left. + \frac{L_i}{3} + \frac{\Delta t \cdot c_i}{4 \cdot b_i} - \frac{\Delta t \cdot a_i}{2 \cdot L_i \cdot b_i} \right) \cdot v_{t,i} + \left( \frac{L_i}{6} - \frac{\Delta t \cdot c_i}{4 \cdot b_i} + \frac{\Delta t \cdot a_i}{2 \cdot L_i \cdot b_i} \right) \cdot v_{t,i+1} \quad (EQ. E.27)$$

### E.3.1 Implémentation des conditions de bord

Les conditions de bord connues imposent une modification de la matrice [D]. Une méthode est présentée pour le cas où les conditions de bord au noeud 0 sont connues. La même démarche peut être entreprise lorsque les conditions de bord sont connues pour le noeud  $n$ . En explicitant la première et la seconde ligne (EQ. E.23), les deux équations suivantes sont formées (EQ. E.28 et EQ. E.29) [Roelfstra01, modèle].

$$d_{10} \cdot v_{t+\Delta t,0} + d_{00} \cdot v_{t+\Delta t,1} = b_0 \quad (EQ. E.28)$$

$$d_{20} \cdot v_{t+\Delta t,0} + d_{11} \cdot v_{t+\Delta t,1} + d_{01} \cdot v_{t+\Delta t,2} = b_1 \quad (EQ. E.29)$$

En isolant  $v_{t+\Delta t,0}$  dans (EQ. E.28), et en remplaçant le résultat dans (EQ. E.29), on peut écrire cette nouvelle équation (EQ. E.30).

$$d_{20} \cdot \left( \frac{b_0}{d_{10}} - \frac{d_{00} \cdot v_{t+\Delta t,1}}{d_{10}} \right) + d_{11} \cdot v_{t+\Delta t,1} + d_{01} \cdot v_{t+\Delta t,2} = b_1 \quad (EQ. E.30)$$

En disposant les termes de manière appropriée de cette dernière équation (EQ. E.30), on peut écrire cette équation (EQ. E.31).

$$\left( d_{11} - \frac{d_{00} \cdot d_{20}}{d_{10}} \right) \cdot v_{t+\Delta t,1} + d_{01} \cdot v_{t+\Delta t,2} = b_1 - \frac{b_0 \cdot d_{20}}{d_{10}} \quad (EQ. E.31)$$

A présent, il suffit de substituer dans la matrice [D], les éléments suivants et les conditions aux limites sont insérés dans le modèle. La nouvelle matrice est nommée [D\*] pour des questions de lecture (EQ. E.32, EQ. E.33, EQ. E.34, EQ. E.35, EQ. E.36 et EQ. E.37).

$$d_{10}^* = 1 \quad (EQ. E.32)$$

$$d_{00}^* = 0 \quad (EQ. E.33)$$

$$b_0^* = B_{ext} \quad (EQ. E.34)$$

$$d_{20}^* = 0 \quad (EQ. E.35)$$

$$d_{11}^* = d_{11} - \frac{d_{00} \cdot d_{20}}{d_{10}} \quad (EQ. E.36)$$

$$b_1^* = b_1 - \frac{b_0 \cdot d_{20}}{d_{10}} \quad (EQ. E.37)$$

$B_{ext}$  conditions de bord.

### E.3.2 Résolution de l'équation linéaire

La première étape consiste de créer une matrice triangulaire supérieure (EQ. E.39) à partir de l'équation linéaire transformée avec les conditions de bord (EQ. E.38) [Roelfstra01, modèle].

$$\begin{bmatrix} d_{10}^* & d_{00}^* & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ d_{20}^* & d_{11}^* & d_{01} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_{21} & d_{12} & d_{02} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & d_{22} & d_{13} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & d_{0,i-1} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{2,i-1} & d_{1i} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & d_{0,n-1}^* \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{2,n-1}^* & d_{1n}^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{t+\Delta t, 0} \\ v_{t+\Delta t, 1} \\ v_{t+\Delta t, 2} \\ v_{t+\Delta t, 3} \\ \dots \\ v_{t+\Delta t, i} \\ \dots \\ v_{t+\Delta t, n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_0^* \\ b_1^* \\ b_2 \\ b_3 \\ \dots \\ b_i \\ \dots \\ b_n^* \end{bmatrix} \quad (EQ. E.38)$$

$$\begin{bmatrix} d_{10}^* & d_{00}^* & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_{11}' & d_{01} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & d_{12}' & d_{02} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{13}' & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & d_{0,i-1} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{1i}' & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & d_{0,n-1}^* \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{1n}' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{t+\Delta t, 0} \\ v_{t+\Delta t, 1} \\ v_{t+\Delta t, 2} \\ v_{t+\Delta t, 3} \\ \dots \\ v_{t+\Delta t, i} \\ \dots \\ v_{t+\Delta t, n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_0' \\ b_1' \\ b_2' \\ b_3' \\ \dots \\ b_i' \\ \dots \\ b_n' \end{bmatrix} \quad (EQ. E.39)$$

En partant de  $i = 1$  jusqu'à  $i = n$  (EQ. E.41) ou  $n-1$  (EQ. E.40), l'équation précédente (EQ. E.39) s'obtient en faisant les opérations suivantes (EQ. E.40 et EQ. E.41).

$$d_{1i}' = d_{1i} - \frac{d_{2,i-1} \cdot d_{0,i-1}}{d_{1,i-1}} \quad (EQ. E.40)$$

$$b_i' = b_i - \frac{d_{2,i-1} \cdot b_{i-1}}{d_{1,i-1}} \quad (EQ. E.41)$$

La dernière étape, partant de  $i = n-1$  jusqu'à  $i = 0$ , permet d'obtenir la solution de  $v_{t+\Delta t, i}$  (EQ. E.42 et EQ. E.43).

$$v_{t+\Delta t, n} = \frac{b_n'}{d_{1n}'} \quad (EQ. E.42)$$

$$v_{t+\Delta t, i} = -\frac{b_i' - d_{0i} \cdot v_{t+\Delta t, i+1}}{d_{1i}'} \quad (EQ. E.43)$$

### E.3.3 Itérations sur le résultat

Lorsque les paramètres  $a$ ,  $b$  ou  $c$  (EQ. E.1) dépendent du résultat  $v_{t+\Delta t,i}$  ou de la position  $x$  ou même du temps  $t$ , le résultat est obtenu par itération jusqu'à ce que l'erreur des résultats entre l'itération précédente et celle courante atteigne une valeur fixée. Grâce à cette itération, une simplification a été opérée (EQ. E.18, EQ. E.19 et EQ. E.20), les paramètres  $a$ ,  $b$  et  $c$  ont été sortis de l'intégration et sont définis comme des valeurs constantes.

### E.4 Entraînement des ions chlorures par l'eau

La vitesse moyenne ou le flux de l'eau est discrétisé par la méthode des éléments finis. Le signe, plus ou moins (EQ. E.44), dépend de la direction de la venue d'eau par capillarité.

$$q = D_h \cdot \overrightarrow{\text{grad}H} \pm D_{\text{cap}} \quad (\text{EQ E.44})$$

- $D_{\text{cap}}$  [mm/s] coefficient de capillarité,  
 $D_h$  [mm<sup>2</sup>/s] coefficient de diffusion de la vapeur d'eau,  
 $H$  [-] humidité relative dans les pores du béton,  
 $q$  [mm/s] flux ou vitesse de l'eau.

La forme faible (§ E.2) peut s'écrire sous la forme de l'équation ci-après (EQ. E.45).

$$q = \int_{h_L}^{h_R} (D_h \cdot [N(x)]^T \cdot [B(x)]) dH \pm (D_{\text{cap}} \cdot [I]) = \frac{D_h}{2} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{Bmatrix} \pm \left( D_{\text{cap}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right) \quad (\text{EQ E.45})$$

- $[N(x)]$  matrice des fonctions d'interpolation,  
 $[B(x)]$  matrice de relation flux et concentration de  $h$ ,  
 $[I]$  matrice identité,  
 $x$  position dans le béton,  
 $h$  valeur de l'humidité relative au noeud.

L'assemblage (§ E.3) permet d'obtenir la vitesse de l'eau sur chaque noeud (EQ. E.46).

$$\begin{Bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ \dots \\ q_n \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} -D_{h0} & D_{h0} & 0 & \dots & 0 \\ -D_{h0} & D_{h0} - D_{h1} & D_{h1} & \dots & 0 \\ 0 & -D_{h1} & D_{h1} - D_{h2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & D_{h,n-1} \\ 0 & 0 & 0 & -D_{h,n-1} & D_{h,n-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} h_0 \\ h_1 \\ h_2 \\ \dots \\ h_n \end{Bmatrix} \pm \begin{bmatrix} D_{\text{cap}0} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & D_{\text{cap}1} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{\text{cap}2} \end{bmatrix} \quad (\text{EQ E.46})$$

Sur chaque noeud, le déplacement moyen des ions chlorures prend en considération le coefficient de retard et l'intervalle de temps considéré (EQ. E.47).

$$d_{\text{Cl},i} = q_i \cdot R_{\text{Cl}} \cdot \Delta t \quad (\text{EQ E.47})$$

- $d_{\text{Cl}}$  [mm] déplacement moyen des ions chlorures,

$R_{Cl}$  coefficient de retard,  
 $\Delta t$  [s] intervalle de temps.

L'esquisse (Figure E.1 a) montre que le bilan de concentration d'ions chlorures est faussé en utilisant une méthode conventionnelle [Roelfstra00] [Roelfstra01]. Aussi l'algorithme prend en considération le bilan de conservation des ions chlorures (EQ. E.48).

$$\begin{Bmatrix} B_0 \\ B_1 \\ B_2 \\ \dots \\ B_n \end{Bmatrix} = \frac{1}{8} \cdot \begin{bmatrix} 3 \cdot l_0 & l_0 & 0 & \dots & 0 \\ l_0 & 3 \cdot (l_0 + l_1) & l_1 & \dots & 0 \\ 0 & l_1 & 3 \cdot (l_1 + l_2) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & l_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & l_{n-1} & 3 \cdot l_{n-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} c_{f0} \\ c_{f1} \\ c_{f2} \\ \dots \\ c_{fn} \end{Bmatrix} \quad (EQ. E.48)$$

$B$  [kg.mm/m<sup>3</sup>] surface reliant la concentration des ions chlorures à une distance rapportée aux dimensions des éléments finis,

$l$  ou  $L$  [mm] longueur d'un élément fini,

$c_f$  [kg/m<sup>3</sup>] concentration en ions chlorures libres rapportée à la solution liquide.

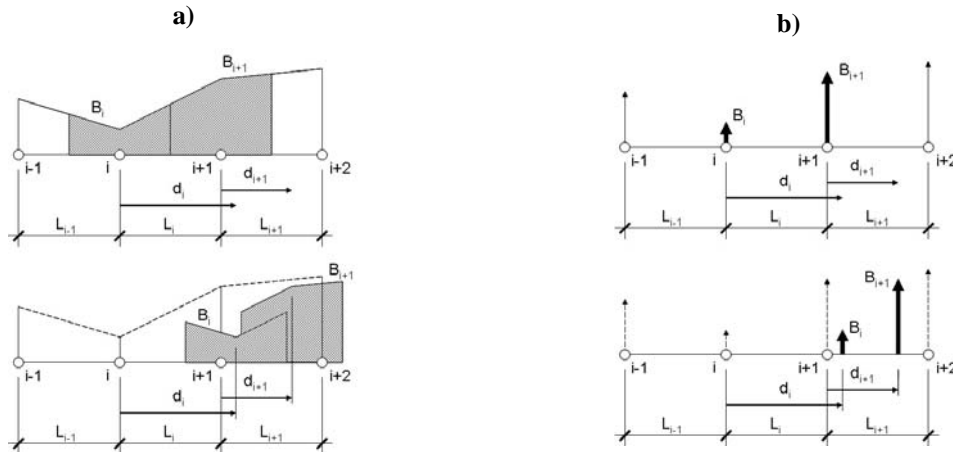


FIGURE E.1: Schémas montrant le déplacement des ions chlorures a) mise en évidence de l'incohérence à cause de la superposition des surfaces, b) transformation en surface rapportée au noeud représenté par un vecteur.

Chaque surface  $B_i$  est rapportée au noeud sous forme de vecteur (Figure E.1). Chaque surface  $B_i$  subit un déplacement  $d_i$  (Figure E.1). Après ce déplacement, la surface  $B_i$  ne se trouve pas forcément sur un noeud. Cette surface est reportée sur les noeuds en utilisant l'analogie de la résolution statique d'une poutre simple pour prendre en considération de l'influence de la distance sur l'élément. Ainsi dans l'exemple développé dans les esquisses (Figure E.1), la surface  $B_i$  sera reportée sur les noeuds  $i+1$  et  $i+2$  par la formulation suivante (EQ. E.49, EQ. E.50 et Figure E.2).

$$D_{i+1} = \frac{B_i \cdot b}{l_{i+1}} \quad (EQ. E.49)$$

$$D_{i+2} = \frac{B_i \cdot a}{l_{i+1}} \quad (EQ. E.50)$$

- D [kg.mm/m<sup>3</sup>] surface reliant la concentration des ions chlorures à une distance rapportée aux dimensions des éléments finis,  
a et b [mm] distances de la position du vecteur  $B_i$  dans l'analogie de la poutre simple.

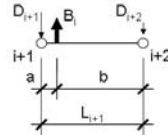


FIGURE E.2: Résolution par l'analogie de la poutre simple pour rapporter les surfaces  $B_i$  déplacées au noeud.

Finalement, la concentration des ions chlorures est obtenue à partir d'une équation identique à (EQ. E.48), mais avec comme inconnue le vecteur des concentrations des ions chlorures (EQ. E.51).

$$\begin{Bmatrix} D_0 \\ D_1 \\ D_2 \\ \dots \\ D_n \end{Bmatrix} = \frac{1}{8} \cdot \begin{bmatrix} 3 \cdot l_0 & l_0 & 0 & \dots & 0 \\ l_0 & 3 \cdot (l_0 + l_1) & l_1 & \dots & 0 \\ 0 & l_1 & 3 \cdot (l_1 + l_2) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & l_{n-1} \\ 0 & 0 & 0 & l_{n-1} & 3 \cdot l_{n-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} c_{f0} \\ c_{f1} \\ c_{f2} \\ \dots \\ c_{fn} \end{Bmatrix} \quad (EQ. E.51)$$

L'équilibre local [Babarulo00] sur les noeuds d'extrémité n'est pas garanti. Ces noeuds gardent par hypothèse la valeur des conditions de bord, la concentration des ions chlorure dans l'eau (§ E.3.1)

## E.5 Simplifications de l'équation générale de la carbonatation

L'équation générale de transport du gaz carbonique tient compte du taux de remplissage des pores par l'eau, de la dissolution du gaz carbonique dans l'eau, de la transformation de la portlandite par consommation des silicates de tricalcium et de dicalcium (EQ. E.52) [Papadakis91].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon \cdot (1-f) \cdot [CO_2]) = \text{div}(D_B(\epsilon, H_{ext}) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}([CO_2])) - (\epsilon_{ini} \cdot f_w \cdot r_{CH} + 3 \cdot r_{CSH} + 3 \cdot r_{C3S} + 2 \cdot r_{C2S}) \quad (EQ. E.52)$$

Sous une forme identique à l'équation précédente, il est possible de représenter sous forme d'équation la balance des masses de la portlandite solide (EQ. E.53), dissoute (EQ. E.54), des silicates hydratés (EQ. E.55), des silicates de tricalcium (EQ. E.56) et des silicates de dicalcium (EQ. E.57) [Papadakis91].

$$\frac{\partial}{\partial t}[Ca(OH)_2(s)] = r_{H,CH} - r_D \quad (EQ. E.53)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\epsilon \cdot f \cdot [Ca(OH)_2(aq)]) = \text{div}(D_{e,Ca(OH)_2(aq)} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}([Ca(OH)_2(aq)])) - (\epsilon_{ini} \cdot f_w \cdot r_{CH}) + r_D \quad (EQ. E.54)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[CSH] = r_{H,CSH} - r_{CSH} \quad (EQ. E.55)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[C_3S] = -r_{H,C3S} - r_{C3S} \quad (EQ E.56)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[C_2S] = -r_{H,C2S} - r_{C2S} \quad (EQ E.57)$$

$[Ca(OH)_2(s)]$	$[mol/m^3 \text{béton}]$	concentration molaire de la portlandite non dissoute,
$r_{H,CH}$	$[mole/s.m^3 \text{béton}]$	taux de réaction par l'hydratation du ciment pour former de la portlandite,
$r_D$	$[mole/s.m^3 \text{béton}]$	taux de dissolution de la portlandite sous forme aqueuse,
$[Ca(OH)_2(aq)]$	$[mol/m^3 \text{béton}]$	concentration molaire de la portlandite sous forme aqueuse,
$D_{e,Ca(OH)_2(aq)}$	$[mm^2/s]$	coefficient de diffusion de la portlandite sous forme aqueuse,
$[CSH]$	$[mol/m^3 \text{béton}]$	concentration molaire du silicate de calcium hydraté,
$r_{H,CSH}$	$[mole/s.m^3 \text{béton}]$	taux de réaction moyen par l'hydratation du ciment pour former des silicates de tricalcium et dicalcium,
$[C_3S]$	$[mol/m^3 \text{béton}]$	concentration molaire du silicate de tricalcium,
$r_{H,C3S}$	$[mole/s.m^3 \text{béton}]$	taux de réaction par l'hydratation du ciment pour former des silicates de tricalcium,
$[C_2S]$	$[mol/m^3 \text{béton}]$	concentration molaire du silicate de dicalcium,
$r_{H,C2S}$	$[mole/s.m^3 \text{béton}]$	taux de réaction par l'hydratation du ciment pour former des silicates de dicalcium.

Dans l'équation de l'évolution de la balance des masses de la portlandite sous forme aqueuse (EQ. E.54), les termes de dissolution et du gradient spatial de la portlandite sont négligeables pour des humidités relatives atmosphériques moyennes inférieures à 90%, ainsi l'équation suivante (EQ. E.58) peut être formulée à partir des hypothèses susmentionnées et en sommant la portlandite sous forme aqueuse et sous forme solide (EQ. E.53, EQ. E.54) [Papadakis91].

$$\frac{\partial}{\partial t}[Ca(OH)_2] = r_{H,CH} - (\epsilon_{ini} \cdot f_w \cdot r_{CH}) \quad (EQ E.58)$$

Dans l'équation de la balance des masses du gaz carbonique (EQ. E.52), la valeur du terme  $\epsilon \times (1-f)$  est très petite devant  $\epsilon_{ini} \times (1-f)$ , en ajoutant à cela la variation temporelle, également très petite, ces termes peuvent ainsi être négligés. Le coefficient de diffusion du gaz carbonique est également petit devant la production de portlandite, de silicate de calcium hydraté, de silicate de tricalcium et de silicate de dicalcium. Ainsi la variation spatiale, représentée par le gradient, doit prendre une valeur extrêmement grande pour contrebalancer la valeur du coefficient de diffusion du gaz carbonique. Ainsi il est possible d'écrire l'équation ci-après (EQ. E.59) [Papadakis91].

$$\text{div}(D_B(\epsilon, H_{ext}) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}([CO_2])) = 0 \quad (EQ E.59)$$

En séparant l'équation en deux, l'une dans la zone non carbonatée et l'autre dans la zone carbonatée, un grand nombre de simplifications peuvent encore être apportées. Dans la zone non carbonatée, la quantité de gaz carbonique est nulle et la portlandite, le silicate de calcium hydraté, le silicate de tricalcium et dicalcium gardent la valeur initiale d'une pâte de ciment non carbonatée. Dans la région carbonatée, toute la portlandite, le silicate de calcium hydraté, le silicate de tricalcium et dicalcium sont totalement consommés peuvent avoir ainsi une valeur nulle. Toujours dans la région carbonatée, la con-

centration en gaz carbonique est nulle à la profondeur de carbonatation et croît linéairement jusqu'à l'interface air et béton pour atteindre à ce niveau la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère limitrophe. Ainsi dans la zone carbonatée, l'équation suivante peut être écrite (EQ. E.60), elle s'obtient en transformant la dernière équation en une dimension puis en intégrant deux fois dans la zone carbonatée et en posant les conditions de bord discutées [Papadakis91].

$$[CO_2] = [CO_2]_{\text{ext}} \cdot \frac{1-x}{x_c} \quad (\text{EQ. E.60})$$

$[CO_2]_{\text{ext}}$  [mol/m<sup>3</sup>air] concentration molaire du gaz carbonique dans l'atmosphère.

Le taux de réaction du à l'hydratation du silicate de calcium hydraté et celui de la portlandite peuvent être exprimés par l'intermédiaire du taux de réaction de leurs composants (EQ. E.61) [Papadakis91].

$$r_{H, CSH} = \frac{r_{H, C3S} + r_{H, C2S}}{2} \quad (\text{EQ. E.61})$$

$$r_{H, CH} = \frac{3}{2} \cdot r_{H, C3S} + \frac{1}{2} \cdot r_{H, C2S} - (2 \cdot r_{H, C4AF, S} + 4 \cdot r_{H, C4AF} + r_{H, C3A}) \quad (\text{EQ. E.62})$$

$r_{H, C4AF, S}$  [mole/s.m<sup>3</sup>béton] taux de réaction par l'hydratation du ciment par l'aluminoferrite de calcium,

$r_{H, C4AF}$  [mole/s.m<sup>3</sup>béton] taux de réaction par l'hydratation du ciment par la consommation du gypse,

$r_{H, C3A}$  [mole/s.m<sup>3</sup>béton] taux de réaction par l'hydratation du ciment par l'aluminate de tricalcium.

En combinant les dernières équations de taux de réaction (EQ. E.61, EQ. E.62) et les équations des bilans de masse (EQ. E.56, EQ. E.57 et EQ. E.58) avec l'équation (EQ. E.52), il est possible d'exprimer la carbonatation sous une forme simplifiée (EQ. E.63) [Papadakis91].

$$\text{div}(D_B(\epsilon, H_{\text{ext}}) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}([CO_2])) + \frac{\partial}{\partial t}([Ca(OH)_2] + 3 \cdot [CSH] + 3 \cdot [C_3S] + 2 \cdot [C_2S]) +$$

$$+ 2 \cdot r_{H, C4AF, S} + 4 \cdot r_{H, C4AF} + r_{H, C3A} = 0$$

En multipliant cette dernière équation par la variation de la profondeur de carbonatation  $dx_c$ , les deux premiers termes se simplifient en évaluant sur les conditions de bord  $x_c^+$ ,  $x_c^-$ ,  $t(x_c^+)$  et  $t(x_c^-)$  (EQ. E.64, EQ. E.65). Le troisième terme, partie de réaction chimique, vaut zéro, car il est infiniment petit. Ainsi l'équation (EQ. E.63) peut s'écrire comme ci-après avec cette nouvelle simplification (EQ. E.66) [Papadakis91].

$$D_B(\epsilon, H_{\text{ext}}) \cdot \frac{d}{dx}[CO_2] \Big|_{x_c^-}^{x_c^+} = D_B(\epsilon, H_{\text{ext}}) \cdot [CO_2]_{\text{ext}} / x_c \quad (\text{EQ. E.64})$$



$$\frac{\partial x_c}{\partial t} \cdot ([Ca(OH)_2] + 3 \cdot [CSH] + 3 \cdot [C_3S] + 2 \cdot [C_2S]) \Bigg|_{t(Xc^-)}^{t(Xc^+)} = \quad (EQ E.65)$$

$$= \frac{\partial x_c}{\partial t} \cdot ([Ca(OH)_2]_{ini} + 3 \cdot [CSH]_{ini} + 3 \cdot [C_3S]_{ini} + 2 \cdot [C_2S]_{ini})$$

$$x_c \cdot \frac{\partial x_c}{\partial t} = \frac{D_B(\epsilon, H_{ext}) \cdot [CO_2]_{ext}}{[Ca(OH)_2]_{ini} + 3 \cdot [CSH]_{ini} + 3 \cdot [C_3S]_{ini} + 2 \cdot [C_2S]_{ini}} \quad (EQ E.66)$$

ini indice, indiquant une concentration avant carbonatation de la pâte de ciment,

ext indice, indiquant d'une concentration ou un taux d'humidité ou de gaz carbonique contenue dans l'atmosphère.

En utilisant la condition initiale  $x_c=0$  au temps  $t=0$ , il est possible d'intégrer cette dernière équation (EQ. E.66). La profondeur de carbonatation dépend ainsi d'une constante multipliant la racine du temps (EQ. E.67).

$$x_c = \sqrt{\frac{D_B(\epsilon, H_{ext}) \cdot [CO_2]_{ext}}{[Ca(OH)_2]_{ini} + 3 \cdot [CSH]_{ini} + 3 \cdot [C_3S]_{ini} + 2 \cdot [C_2S]_{ini}}} \cdot t \quad (EQ E.67)$$

Dans un béton complètement hydraté, le  $[C_3S]_{ini}$  et le  $[C_2S]_{ini}$  vaut zéro (EQ. E.68) [Papadakis89].

$$x_c = \sqrt{\frac{D_B(\epsilon, H_{ext}) \cdot [CO_2]_{ext}}{[Ca(OH)_2]_{ini} + 3 \cdot [CSH]_{ini}}} \cdot t \quad (EQ E.68)$$

Le coefficient de diffusion du gaz carbonique dans le béton dépend de la porosité, de la connexion entre les pores et du taux de remplissage par l'eau des pores. Tirée de mesures expérimentales, une formulation empirique est proposée (EQ. E.69) [Papadakis00].

$$D_B(\epsilon, H_{ext}) = A \cdot \left( \frac{\epsilon}{\frac{C}{\rho_C} + \frac{G}{\rho_G} + \frac{E}{\rho_w}} \right)^a \cdot (1 - H_{ext})^b \quad (EQ E.69)$$

A paramètre obtenu d'une régression linéaire à partir de données expérimentales valant  $1.64 \cdot 10^{-6}$ ,

a paramètre obtenu d'une régression linéaire à partir de données expérimentales valant 1.8,

b paramètre obtenu d'une régression linéaire à partir de données expérimentales valant 2.2.

L'utilisation d'un ciment portland usuel permet d'utiliser la formule suivante, en considérant que la concentration molaire totale peut être consommée par la réaction de carbonatation (EQ. E.70) [Papadakis92].

$$[Ca(OH)_2]_{ini} + 3 \cdot [CSH]_{ini} = \frac{33000}{1 + (\rho_C/\rho_w) \cdot (E/C) + (\rho_C/\rho_G) \cdot (G/C)} \quad (EQ E.70)$$

Le lien entre la concentration molaire dans le béton et la concentration volumique dans l'air (§ A.1.5) peut être établie à l'aide de cette formulation (EQ. E.71) [Papadakis92].

$$[\text{CO}_2]_{\text{ext}} = 42 \cdot y_{\text{CO}_2} \quad (\text{EQ E.71})$$

$y_{\text{CO}_2}$  [-] concentration volumique de gaz carbonique dans l'air.

Avec ces dernières considérations, le modèle de carbonatation est ainsi utilisable et sa formulation est explicitée ci-après (EQ. E.72), les paramètres a et b de l'équation (EQ. E.69) valent 2.

$$x_c = \frac{1}{16.75} \cdot \frac{\rho_c}{\rho_w} \cdot \frac{(E/C) - 0.3}{1 + (\rho_c/\rho_w) \cdot (E/C)} \cdot (1 - H_{\text{ext}}) \cdot \sqrt{\left(1 + \frac{\rho_c}{\rho_w} \cdot \frac{E}{C} + \frac{\rho_c}{\rho_g} \cdot \frac{G}{C}\right) \cdot y_{\text{CO}_2} \cdot t} \quad (\text{EQ E.72})$$

**Conciatori David**

E-mail : david.conciatori@a3.epfl.ch

Nationalité : suisse et italienne

Date de naissance : 30 août 1973

**Expériences professionnelles**

2001 - 2005     Assistant-doctorant au sein de l'EPFL au laboratoire de Maintenance Construction et Sécurité des ouvrages (MCS) sous la direction du professeur Eugen Brühwiler.

*Recherches : corrosion des armatures sous l'effet des sels de déverglaçage, mécanisme de transport hydrique et chlorique, analyse probabiliste, essais de perméabilité à l'air Torrent, modèle analytique comportemental à la rupture des bétons de fibre.*

*Projets : potentiel d'utilisation des aciers résistants aux ions chlorures, mesures d'humidité et de température sur ouvrages dans les caissons du Pont sur la Denève, étude de l'influence des conditions de coffrage sur le comportement au séchage de la dalle de roulement du passage supérieur CFF Cossonay, détails constructifs pour la réhabilitation du pont Saumont, étude de la probabilité d'initiation de la corrosion par transport des ions chlorures contenus dans le béton d'enrobage pour les ponts de Gran Cornes et A Tous Vents de la route cantonale RC 251.*

*Enseignements : assistance aux cours de «Sécurité et fiabilité I» «Maintenance des ouvrages et infrastructures» «Maintenance des ouvrages» et «Structures I», encadrement d'étudiants dans le cadre de travaux de diplôme et projets de semestre.*

*Laboratoire : responsable informatique du laboratoire.*

1998 - 2000     Assistant-étudiant au sein de l'EPFL dans différents laboratoires, IBOIS, IBAP, LMS et au département du génie civil.

1999 (4 mois)     Stagiaire au service des Routes Nationales à Sion au sein de la cellule des ouvrages d'art.

1989 - 2001     Emploi au bureau d'ingénieurs civils AMy à Sierre, André Melly, apprentissage de dessinateur en génie civil (4 ans), dessinateur en génie civil (3 ans à temps partiel), dessinateur et ingénieur en génie civil (4 ans à temps partiel).

**Formation**

2002     *Diplôme d'ingénieur en sécurité, cours postgrade Risque et Sécurité des Systèmes Techniques à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne et de Zürich et l'Université de Saint-Gall.*

2001     *Diplôme d'ingénieur EPF en génie civil, école polytechnique fédérale de Lausanne, avec une année d'échange Erasmus à la «Scuola politecnico di Milano» (1998-1999).*

1996     *Diplôme d'ingénieur ETS en génie civil, école d'ingénieurs à Fribourg.*

1993     *Certificat de capacité de dessinateur en génie civil, apprentissage au bureau d'ingénieurs civils AMy à Sierre*

**Langues**

Français     langue maternelle

Allemand     écrit et parlé, connaissances scolaires

Italien     bonnes connaissances

Anglais     niveau intermédiaire

